

LES PARTICULES ELEMENTAIRES
DE THALES A GELL-MANN

par Georges J. KAYAS

Ecole Polytechnique (LPNHE)

91128 PALAISEAU

-1982-

Dubois
1984.

LES PARTICULES ELEMENTAIRES DE THALES A GELL-MANN

par Georges J. KAYAS

Ecole Polytechnique (LPNHE)

91128 PALAISEAU

-1982-

Ὁ γὰρ γνοὺς καὶ μὴ σαφῶς διδάξας
ὥς καὶ μὴ ἐνεθυμήθη.

Θουκυδίδης

Celui qui a acquis la connaissance
sans être capable de l'enseigner clairement,
c'est tout comme s'il n'avait rien appris.

Thucydide

PREMIERE PARTIE

(De l'antiquité à 1945)

PREFACE

Les Particules Élémentaires constituent une des branches les plus récentes de la Physique du XXème siècle qui s'ouvre avec la découverte de l'électron (1897), mais ce n'est que trente ans plus tard (1932) que la notion de Particule Élémentaire ou Fondamentale (proton, neutron, électron négatif et positif, photon et neutrino) commence à faire partie du vocabulaire de la Physique.

Quinze ans après cette branche prend un nouvel élan par la découverte de la particule prédite par la théorie de Yukawa, suivie de très près de celle des particules dites "étranges" (kaons et hypérons) qui dans peu d'années (1947-1955) ont placé les physiciens dans la même situation que Mendéléév un siècle auparavant à propos des éléments chimiques.

Il serait donc très tôt pour écrire l'histoire des particules élémentaires et tel n'est pas strictement le but poursuivi ici. Mais la vitesse avec laquelle cette branche de la physique se développe actuellement et l'accumulation d'une grande quantité d'information en peu de temps font que les circonstances de ces découvertes fondamentales pour l'histoire de la physique et la manière dont les problèmes ont surgi et se sont enchaînés dans le temps commence à s'estomper au point que même ceux qui ont participé à ces recherches ne conservent qu'un souvenir peu précis sur l'enchaînement des idées et des faits qui se sont déroulés pendant les trente dernières années.

Il est d'autre part bien connu que l'idée première d'une constitution discrète de la matière est aussi vieille que la civilisation

elle-même et tout semble s'être passé comme si l'homme était né avec la hantise du problème de la matière, car, à partir du moment où il a appris à raisonner, on le voit aux prises avec des problèmes de la vie. Cette tendance se manifeste dès la période mythologique, mais ce n'est finalement qu'avec la première apparition timide du rationalisme grec de l'Ecole de Milet qu'une spéculation intense se poursuit avec Thalès, les pythagoriciens, les cercles de l'Académie de Platon et du Lycée d'Aristote et de leurs successeurs.

La position du problème n'est donc pas nouvelle, mais son aspect actuel l'est beaucoup plus. Il ne nous a pas semblé inutile de reprendre le problème à sa base et d'essayer de dégager, dans son évolution à travers les siècles, les lignes principales du développement de la pensée dans le chemin sinueux qu'elle a suivi pour aboutir aux conceptions actuelles, toujours sujettes à révision et d'une fluidité constante.

La première partie de ce travail couvre la période qui s'étend de l'antiquité à 1945 au moment où les recherches sur le rayonnement cosmique semblaient indiquer l'existence dans la nature de la particule de Yukawa et que la seconde guerre mondiale vint interrompre.

Une deuxième partie couvre la période 1945-1980, soit une trentaine d'années d'une recherche intense dont l'importance dépasse de loin ce qui avait été fait pendant les trente siècles qui ont précédé.

D'autre part les choses se sont singulièrement compliquées pendant ces trente dernières années tant au point de vue théorique qu'expérimental, de sorte qu'il devient difficile d'aborder les nombreux problèmes qui ont surgi d'une manière suffisamment simple et élémentaire pour être accessibles à un large public.

Nous nous sommes efforcés de traiter cette évolution très rapide dans son développement historique sans trop de calculs et de détails technologiques, sans pour autant sacrifier la précision, quoique par moment il apparut nécessaire de bousculer légèrement l'ordre chronologique, afin de ne pas interrompre la continuité de l'évolution de tel sujet par-

ticulier. Nous espérons qu'aucun inconvénient n'en résultera pour la cohérence de l'ensemble.

De toute façon ce travail ne prétend ni à être complet ni à la perfection ; d'autres peut-être compléteront nos insuffisances et apporteront des vues nouvelles, afin qu'un public aussi large que possible puisse participer, ne serait-ce que de façon élémentaire, aux acquisitions de la physique et se tenir au courant de l'ampleur de l'aventure scientifique dans l'effort permanent de l'homme à comprendre l'Univers qui l'entoure et à expliquer le pourquoi des phénomènes. Car la valeur culturelle des sciences, de toutes les sciences, n'est heureusement plus à démontrer, tout comme leur rôle dans l'histoire de la civilisation depuis leur émergence de la mythologie, au moment où un demi-dieu, jaloux du repos des hommes, a volé le feu sacré aux dieux. Dans sa démarche pour arracher les secrets de la nature et à côté du désir inné pour apprendre et expliquer les phénomènes dont il était journallement le témoin, l'homme s'est rendu capable non seulement de questionner la nature, mais de la dominer à tel point que ses buts initiaux, qui étaient savoir et comprendre, ont radicalement évolué vers des objectifs nouveaux, qui sont de nos jours prévoir et pouvoir ; il ne se contente plus d'un simple enseignement, il manifeste le désir de dominer ou plus exactement domestiquer la nature et, dans un moment de folie, il serait capable de la détruire, ce qui aurait comme corollaire sa propre destruction. Cette mutation profonde, qui a vu le jour durant la seconde guerre mondiale, n'a pas manqué d'attirer l'attention du pouvoir politique et des milieux dont le souci immédiat s'appelle profit, de sorte que l'on assiste à une sorte d'aliénation de la science, liée désormais, qu'on le veuille ou non, à des intérêts dont elle ne doutait même pas, tellement les choses sont allées vite. Si l'évolution de la science doit, comme cela semble pouvoir se produire, déterminer l'avenir même de l'humanité, cette croissance de pouvoir aura-t-elle une répercussion positive sur la vertu et la sagesse des hommes?

Beaucoup de scientifiques s'en inquiètent à juste titre, d'autres se demandent s'ils ne sont pas devenus inutiles ou mal aimés. Il en résulte que le "savant" ne peut plus s'enfermer dans "sa tour d'ivoire" et "laisser passer, laisser faire". Rien ne traduit mieux le malaise qui règne

IV

actuellement chez les scientifiques que cet appel récent (1977) du conseil du mouvement connu sous le nom de "Pugwash" : "we call all scientists to refrain from taking part in work that is ethically unjustifiable, and to use their influence to prevent industry and government from pursuing such work. In doing so, these scientists would help in the creation of a new value system".

Une autre retombée de cette "croissance" explosive de la science, non moins désastreuse, est une sorte de mystification, qui tend à faire de la physique par exemple, une science ésotérique, accessible aux seuls spécialistes, fortement compartimentée, une sorte de Méta-physique, au sens non-aristotélicien du terme. D'où la saine réaction des physiciens pour une "science pop" (popularising science), accessible, autant que faire se peut, aux plus larges couches du public qu'elle est sensée de servir et d'élever, car l'homme, pas plus que le savant, "ne peut vivre de pain seul".

Si, comme nous le disions, le sort de la physique est lié au sort de l'humanité, il faudrait bien que les physiciens des générations à venir se considèrent comme "le sel du monde".

"Mais si le sel venait de perdre sa saveur, par quoi le remplacer?"

G.J.K.

P.S. Une première version de ce rapport a été diffusée en 1976; nous y avons apporté quelques modifications afin de tenir compte des résultats récemment acquis.

Les astérisques rencontrés dans le texte font appel aux notes placées en fin de volume.

BIBLIOGRAPHIE en fin de volume.

TABLE DES MATIERES

(Première Partie)

Préface.....	Page I
Table des matières.....	V
I. Introduction.....	1
II. Les premières spéculations sur la Nature et sur la Vie.....	5
III. Le Moyen Age.....	35
IV. L'aventure alchimique.....	38
V. La Renaissance et le Grand Siècle.....	43
VI. Le siècle des lumières.....	62
VII. Le XIX siècle et l'éclosion de la théorie atomique.....	73
VIII. Le XXème siècle.....	87
1. L'électron, première particule fondamentale.....	87
2. Le nombre atomique Z	92
3. Le proton, deuxième constituant fondamental de la matière...	96
4. Le photon.....	98
5. Une science nouvelle : la Physique Nucléaire.....	102
6. Le neutron, deuxième constituant du noyau.....	105
7. L'électron positif.....	108
8. Vers une théorie du noyau.....	117
9. Le neutrino.....	121
10. Les rayons cosmiques et la recherche des mésotons.....	127
11. Le progrès technique.....	133
12. La situation théorique.....	135

(Deuxième partie)

Avant-propos.....	139
I. Introduction.....	141
II.1. La particule de Yukawa.....	143
II.2. Le rayonnement cosmique, une mine de particules nouvelles.....	153

III.1. Les muons.....	161
III.2. Les pions.....	164
III.3. Les kaons.....	169
III.3a. Les kaons positifs.....	169
III.3b. Les kaons neutres.....	170
III.3c. Les kaons négatifs.....	172
III.4 Les Hypérons.....	173
III.4a. L'hypéron positif Sigma.....	173
III.4b. Les hypérons neutres.....	175
III.4b.1 L'hypéron Lambda-zéro.....	175
III.4b.2 L'hypéron Sigma-zéro.....	176
III.4b.3 L'hypéron Ksi-zéro.....	176
III.4c. Les hypérons négatifs.....	181
III.4c.1 L'hypéron Sigma-moins.....	181
III.4c.2 L'hypéron Ksi-moins.....	187
III.4c.3 L'hypéron Oméga-moins.....	187
III.4d. Les hyperfragments.....	188
IV. Les techniques.....	191
IV.1 Les accélérateurs de particules.....	191
IV.2 Les faisceaux de particules.....	195
IV.3 Les détecteurs.....	195
IV.4 Les techniques des mesures.....	197
V. Problèmes et paradoxes.....	199
V.1 Production associée et hiérarchie des interactions.....	199
V.2 Le complexe $K^0-\bar{K}^0$ et l'opération de conjugaison de charge...	204
V.3 Le phénomène de régénération.....	206
V.4 Le spin isotopique et l'hypothèse de l'indépendance par rapport à la charge des forces nucléaires.....	211
V.5 Les multiplets de charge déplacée et le nouveau nombre quantique d'étrangeté.....	216
V.6 Le paradoxe théta-tau et la violation de la parité.....	223
VI. Antinucléons et antimatière.....	223
VII. L'interaction électromagnétique et la structure du nucléon (Facteurs de forme électromagnétiques).....	237

VIII.	L'interaction forte.	249
	VIII.1 Dix ans de prophéties théoriques.	249
	VIII.2 Le comportement des sections efficaces.	250
	VIII.3 Une nouvelle vague de particules, les résonances	261
IX.	Classification des particules.	273
	IX.1 La nouvelle nomenclature.	273
	IX.2 Les poles et trajectoires de Regge.	274
	IX.3 La voie octuple, symétrie SU(3).	277
	IX.4 Un cercle vicieux, le Bootstrap.	284
	IX.5 Le modèle des quarks.	287
	IX.6 Les trois spectroscopies.	298
	IX.7 Autres particules : les tachyons ?	300
X.	Le neutrino	302
	X.1 Quelques résultats expérimentaux de la physique des neutrinos	316
	X.1.a Sections efficaces totales.	317
	X.1.b Sections efficaces différentielles.	321
XI.	Les phénomènes de diffusion inélastique.	325
	XI.1 La diffusion profondément inélastique.	329
	XI.2 Diffusion profondément inélastique des neutrinos	337
XII.	Le modèle des partons.	338
XIII.	Vers une théorie unique de toutes les interactions.	345
XIV.	Une nouvelle classe de particules.	349
XV.	Un troisième lepton le Tau.	362
XVI.	Encore une nouvelle classe de particules, les particules Upsilon et les quarks de Beauté et de vérité.	365
XVII.	Et maintenant	373
Notes.	383
Table des particules.	420
Références.	431
Index.	453

PREMIERE PARTIE

(de l'antiquité à 1945)

Quant aux principes eux-mêmes, dieu seul les connaît et ses élus parmi les hommes.

(Platon)

I - INTRODUCTION

Sur l'attitude de l'homme primitif livré à lui-même face à une nature qui ne lui était pas toujours favorable, on ne peut qu'émettre des hypothèses. Occupé peut-être principalement de sa survie et des moyens qui lui assureraient sa nourriture, entouré d'une grande variété de dangers de la part d'animaux plus forts ou plus rusés que lui et obligé de faire face à des conditions climatiques que nous connaissons assez mal, il a, selon toute vraisemblance, cherché en tout premier lieu à se procurer le nécessaire pour vivre, à s'abriter des dangers et à assurer à sa descendance un minimum de possibilités de survie, grâce à un instinct commun à tous les animaux. Les plus anciennes traces qu'il a laissées et que l'on a pu découvrir (traces et peintures dans les grottes qu'il habitait) nous le montrent déjà à un stade bien évolué après une vie d'environ 1/2 million d'années sur laquelle nous n'avons pratiquement aucun renseignement. A son entrée dans la période historique, il y a à peu près 5000 ans, c'est un être profondément transformé. Il connaît le feu et peut-être la roue et le bateau, il possède un langage écrit, il a des armes et il connaît déjà la guerre. Il faut donc lui rendre cette justice, il est le seul être vivant à avoir employé ses capacités intellectuelles afin d'anéantir ou d'éliminer com-

plètement ses semblables avec une cruauté dépassant de loin celle des animaux les plus féroces. Curieuse invention qui pèsera sur lui pour le restant de ses jours comme l'épée de Damoclès.

Il semble qu'il y a environ 30 000 ans il avait déjà commencé à noter, par des traits sur pierre ou sur os, la succession des jours et des nuits, peut-être même des saisons ou des années, en utilisant comme horloge naturelle la lune pour les jours et les mois, puis le soleil pour les années, mais malheureusement nous ne pouvons pas le suivre à cette époque trop reculée. Ses outils, ses armes, ses mégalithes ne sont pas facilement exploitables pour nous et leur interprétation est toujours difficile. Les témoignages les plus précis nous viennent des plus anciennes civilisations que l'on connaisse, celles qui ont fleuri sur les bords du Tigre et de l'Euphrate, celle du Nil et des bords orientaux de la Méditerranée, de la Chine, etc...

Les mythologies de ces civilisations nous montrent un être fortement évolué avec une imagination débordante, mais encore incapable d'une vraie réflexion sur la nature dans le sens de la recherche d'une compréhension et encore moins d'une explication des phénomènes dont il est le témoin passif. Le mouvement du ciel l'intrigue au plus haut point, comme le montrent les différentes mythologies, mais il cherche plutôt à deviner qu'à expliquer ou à comprendre, d'où les premières astrologies et la recherche de l'influence des astres sur tout ce qui concerne sa propre vie.

Les Babyloniens, dès le III^{ème} millénaire avant notre ère, possèdent une arithmétique savante et effectuent des calculs étonnants, leurs astronomes donnent des valeurs de la durée du mois lunaire avec 4 décimales exactes. De même en Egypte, les procédés du calcul n'ont rien à envier aux nôtres et la médecine semble avoir atteint un haut niveau. Bref, toutes ces anciennes civilisations ont accumulé un nombre assez considérable de connaissances empiriques utiles pour la vie publique ou privée, qui se transmettent de génération en génération par des hauts fonctionnaires (prêtres, scribes, comptables ...), mais il ne semble pas que ces connaissances aient été coordonnées en vue d'une meilleure compréhension des choses ou d'une réflexion plus profonde sur le pourquoi des phénomènes ;

bref de ce que nous appelons une science rationnelle.

On ne peut donc que donner, au moins partiellement, raison à Aristote quand il déclare que "ce n'est que quand le nécessaire à la vie était acquis" que les hommes ont commencé à s'occuper de philosophie, à partir du moment où ils ont eu "suffisamment de loisirs". Nous disons bien partiellement parce que cette condition nécessaire ne semble pas suffisante ; les exigences de la vie publique et privée ont très probablement joué un rôle non négligeable dans cet effort de réflexion de l'homme. Hérodote⁽¹⁾, en effet nous raconte comment la Géométrie a pris naissance en Egypte à cause des inondations provoquées par le Nil et du besoin de répartir de nouveau les terres ou de calculer l'impôt proportionnel sur les propriétés. Mais il ne semble pas que ces "sciences" soient sorties du stade de recettes pratiques de calcul. Il n'y avait en particulier pas de science pouvant prétendre au nom de physique jusqu'au VIème siècle avant notre ère, époque à laquelle apparaissent les premières spéculations grecques sur la nature, non seulement pour connaître, mais pour comprendre et expliquer.

II - LES PREMIERES SPECULATIONS SUR LA

NATURE ET SUR LA VIE

Le physicien n'étant habituellement pas philosophe (à quelques exceptions près) nous avons pensé qu'il serait plus prudent de notre part et plus profitable aux autres de nous adresser à un guide de confiance pour démêler les opinions souvent compliquées et surtout d'accès difficile (à cause du manque de documents) de la période grecque. Nous avons choisi pour ce faire un des esprits les plus remarquables de l'antiquité : Aristote ⁽²⁾.

Faut-il mettre l'accent sur le fait très important que ce génie polyvalent ne rappelle que brièvement les opinions de ses prédécesseurs dans un but critique et que son impitoyable jugement l'amène parfois, semble-t-il, à modifier les opinions des autres, afin qu'elles puissent prêter plus facilement le flanc à la critique ou bien afin qu'elles aient l'air plus ridicules que les siennes propres ? Retenons cela et laissons lui la parole :

Tous les hommes sont par nature avides de connaissance, comme il ressort de la préférence qu'ils manifestent pour les sens et par dessus tout pour le sens de la vue... On préfère pour ainsi dire la vue à tous les autres sens non seulement en vue de l'action, mais même quand on n'a rien à entreprendre ; la raison en est que la vue,

plus que tout autre sens, nous aide à prendre connaissance des choses et nous révèle leur différenciation. Naturellement, tous les animaux naissent doués de sens, mais certains acquièrent à partir d'eux une mémoire que d'autres n'ont pas et, par conséquent, les premiers sont plus intelligents et plus susceptibles d'apprentissage que les seconds qui n'ont pas la faculté de la mémoire. D'autre part, certains animaux sont intelligents sans aucun apprentissage préalable, en particulier les abeilles et quelques autres espèces similaires, qui n'ont pas la faculté d'ouïr les sons ; par contre seuls sont capables d'apprentissage les animaux qui en plus de mémoire possèdent le sens de l'ouïe.

Ainsi tous les autres animaux vivent avec l'imagination et la mémoire, en ayant une faible part à l'expérience, tandis que l'espèce humaine vit en plus d'art et de raisonnement. C'est la mémoire qui fait acquérir l'expérience à l'homme, car plusieurs souvenirs d'une même chose constituent le potentiel d'une expérience. Il semble d'ailleurs que l'expérience est similaire à la science et à la technique, mais c'est uniquement par l'expérience que s'acquièrent la science et l'art. En effet l'expérience engendre l'art et l'expérience le hasard, comme l'a dit très justement Polos. L'art s'acquiert quand, à partir de plusieurs expériences, on forme un jugement universel sur les objets semblables...

Du point de vue pratique, il paraît que l'expérience ne diffère en rien de l'art, et l'on voit des personnes expérimentées réussir mieux que les raisonneurs sans expérience ; la raison en est que l'expérience est une connaissance du particulier, tandis que l'art est la connaissance de l'universel, et toute action et tout effet produit ne concernent que le particulier.

Ainsi si un médecin est au courant de la théorie sans avoir l'expérience nécessaire, il connaît le général tout en ignorant le particulier et souvent il faillira dans sa thérapeutique, car on ne peut traiter que la maladie particulière...

Néanmoins nous pensons que la connaissance et la spécialité sont du ressort de l'art plutôt que de l'expérience, et partant, nous considérons les artistes comme plus savants que les hommes d'expérience, ce qui implique que toute science vient de la connaissance, du fait que les premiers connaissent la cause que les seconds ignorent ; en effet, les gens expérimentés connaissent les choses et ignorent les causes, tandis que les artistes connaissent aussi bien le comment que le pourquoi des choses...

D'une manière générale, le signe distinctif du savant est sa capacité d'enseigner ; c'est la raison pour laquelle nous pensons habituellement que l'art est une connaissance scientifique et que l'expérience (l'empirie = la connaissance empirique) ne l'est pas. De plus nous ne considérons aucun des sens comme étant une source de sagesse. Les sens sont , en effet, notre source principale de connaissances partielles, mais ne nous disent pas la raison des choses ; ils nous font savoir par exemple que le feu chauffe, mais ils ne nous disent pas pourquoi il chauffe.

En premier lieu donc celui qui a inventé un art, allant au delà des sens, est admiré par ses semblables non seulement pour avoir trouvé quelque chose d'utile, mais aussi en tant que savant et supérieur aux autres. Au fur et à mesure donc que plusieurs découvertes ont été faites, les unes en vue du nécessaire, les autres par passe-temps, les inventeurs des dernières ont toujours été considérés comme plus méritants que ceux des premières, justement du fait que leur science n'avait pas un but utilitaire. Ainsi quand toutes les découvertes de première nécessité furent effectuées, on a vu se développer les sciences n'ayant pour but ni la jouissance, ni la nécessité, et en tout premier lieu dans les pays où les hommes disposaient de suffisamment de loisirs ; c'est la raison pour laquelle c'est en Egypte que se sont constituées tout d'abord les sciences mathématiques, grâce à la classe des prêtres qui disposait de loisirs... Il est donc clair que la science est la connaissance approfondie de certains principes et de certaines causes.

Puisque donc nous sommes en train de mener notre enquête sur ce genre de science, il serait naturel de commencer par réfléchir sur la question suivante : de quelles causes et de quels principes cette science est-elle la connaissance ? La réponse à cette question surgit de façon évidente si l'on considère les opinions que nous avons sur les savants. On considère habituellement qu'un savant tout d'abord sait tout, dans la mesure du possible bien sûr, sans avoir pour autant une connaissance approfondie de chaque chose particulière ; on pense ensuite que le savant est celui qui connaît les choses difficiles et non aisément compréhensibles au commun des mortels (la perception est bien commune à tous et facile mais n'est pas une sagesse pour autant) ; de plus, en toute matière, on regarde comme plus savant celui qui est plus exact, plus précis et plus capable d'expliquer les causes. De même d'une manière analogue, la connaissance pour elle-même et dans le seul but de connaître nous semble préférable et plus scientifique que celle ayant un but utilitaire quelconque et nous la jugeons supérieure à toute science auxiliaire. Il ne faudrait par conséquent pas que le savant reçoive des ordres, mais qu'il en donne, ni qu'il obéisse aux autres mais bien qu'il commande au moins savant.

Voilà donc quelles sont nos idées générales sur les savants et les sciences. Il en résulte que celui qui est en possession de la science du général possède aussi la connaissance de toutes choses, car il connaît d'une certaine façon toutes les choses particulières.

D'autre part, la science du général est beaucoup plus difficile à acquérir que celle du particulier, car elle va au delà des sens. Les plus exactes parmi toutes les sciences sont donc bien celles ayant pour objet les causes premières, et celles qui sont fondées sur le plus petit nombre d'axiomes sont plus exactes que celles qui en admettent plusieurs ; ainsi l'arithmétique est plus exacte que la géométrie. De plus la science qui considère les causes est plus instructive, car c'est bien celui qui nous explique les causes de chaque phénomène particulier qui est à proprement parler un enseignant.

Il découle de ces considérations que le nom que nous cherchons appartient à une même science, à savoir à celle qui spéculé sur les premiers principes et les causes, car le Bien et la Fin sont bien des causes.

Que cette science ne soit pas une science de production utilitaire cela devient clair entre autres si l'on considère les premiers qui ont commencé à philosopher. C'est effectivement par l'étonnement que les hommes, aussi bien maintenant que de tout temps, ont commencé à s'occuper de philosophie. Ils ont manifesté leur étonnement tout d'abord devant les difficultés les plus courantes, puis ils ont avancé graduellement en se posant petit à petit des questions sur des difficultés d'un ordre plus élevé, comme par exemple les phases de la Lune, le mouvement du Soleil et des Astres ou l'origine de l'Univers. Or celui qui manifeste son étonnement et commence à se poser des questions a parfaitement conscience de son ignorance (et dans ce sens l'amateur des mythologies est déjà en quelque sorte un philosophe, puisqu'un mythe n'est qu'une suite de merveilles) de sorte que si les premiers des sages ont commencé à philosopher pour combattre leur ignorance, il n'est pas moins évident qu'ils ont recherché la science pour la connaissance et non pas pour une utilité pratique quelconque. La suite même de l'évolution en témoigne, car ce genre de recherches a bien débuté, au moment où tout le nécessaire à la vie était acquis, pour le pur plaisir et le passe temps. Il est donc clair qu'on n'aspire pas à la science par une nécessité particulière, mais, tout comme on dit qu'est libre l'homme qui ne dépend pas d'autrui, de même cette science est la seule libre, car elle n'existe que par elle-même et pour elle-même.

Ce n'est donc pas sans raison que l'on serait tenté de croire que son acquisition est au-dessus du pouvoir de l'homme, car la nature de l'homme est servile sous bien des rapports, de sorte que, comme Simmonide l'a dit, seul un dieu pourrait avoir ce privilège, l'homme devant chercher seulement la connaissance qui est à sa portée.

Effectivement si les poètes qui chantent la jalousie des dieux

ont raison, la divinité serait plus vraisemblablement jalouse de cela et tous les autres êtres seraient malheureux. Or il est impossible que le dieu soit jaloux (ce sont les poètes qui racontent des histoires), ou qu'il faille penser qu'il existe une autre forme de connaissance plus précieuse ; car cette connaissance-là est précisément la plus divine et la plus précieuse de toutes ...

Maintenant il nous faudra considérer l'acquisition de cette connaissance suivant un processus en quelque sorte inverse de l'approche par laquelle nous avons commencé notre investigation. Je viens de le dire, tout le monde commence d'abord par s'étonner du fait que les phénomènes se déroulent de la manière dont ils se déroulent, par exemple des gestes de marionnettes, des rétrogradations du soleil ou de l'incommensurabilité de la diagonale du carré par rapport à son côté ; il semble effectivement étonnant, à qui n'a jamais considéré la raison, pourquoi une certaine grandeur continue n'est pas mesurable par la moindre unité, mais il faut bien finir par le point de vue contraire (et selon le proverbe, le meilleur), comme nous le faisons pour toutes choses que nous avons bien fini par comprendre ; car un géomètre serait bien plus étonné si la diagonale du carré était commensurable...

Puisque donc il est clair qu'il nous faut commencer par prendre connaissance des causes premières (c'est seulement quand nous savons la cause que nous disons connaître la chose), disons tout d'abord qu'il y en a de quatre sortes :

a) ce que l'on considère comme la substance ou la nature essentielle des objets (car le pourquoi des objets se réduit finalement à la définition et la nature ultime du pourquoi est principe et cause) ;

b) la matière ou le substrat ;

c) l'origine du mouvement ;

d) la cause opposée, c'est-à-dire le parce que, ou le Bien

(car le Bien est le but final de toute génération et de tout mouvement).

De tout cela nous avons longuement discuté dans la Physique, mais il ne serait pas inutile de revoir ce que tous ceux qui nous ont précédé et qui ont philosophé sur la Vérité ont conjecturé sur la réalité des choses. Il est clair qu'eux aussi ont reconnu certains principes et certaines causes et il serait d'une assistance certaine pour notre présente enquête de résumer leurs opinions ; ainsi découvrirons-nous, peut-être, quelque genre nouveau ou serons-nous plus confiants dans les résultats auxquels ils sont parvenus.

La plupart des premiers philosophes ⁽³⁾ pensaient que les principes de toutes choses sont uniquement matériels ; ils considéraient en effet que les constituants, à partir desquels sont composés en tout premier lieu toutes les choses existantes et en lesquels elles se résolvent finalement, sont les seuls éléments structuraux et les seuls principes des choses, et que la matière persiste éternellement malgré le fait qu'elle change constamment de propriétés. Rien ne se crée et rien ne se perd, pensent-ils, mais cette entité primaire se conserve indéfiniment, tout comme on dit que Socrate ne devient pas du fait qu'il devient musicien, ni ne se perd en perdant cette qualité, car le sujet Socrate est sujet à changement, mais il se conserve ; et il en est de même de toutes choses, car il y a une certaine ou plusieurs entités qui se conservent et à partir desquelles tout le reste a pris naissance. Pourtant ils ne sont pas tous d'accord quant au nombre et aux caractères spécifiques de ces principes.

Ainsi Thalès, le chef de file de cette philosophie, pensait que ce principe est l'Eau (c'est pourquoi il soutenait que la terre flotte sur l'eau), incité peut-être par l'observation que toute nourriture est liquide et que même la chaleur dérive de l'eau et se nourrit de l'eau (et ce de quoi chaque chose dérive est principe de toute chose) et que toutes les semences sont de nature fluide, puisque l'eau est à l'origine de la fluidité.

Certains même pensent (Platon ?) que ces hommes des temps très reculés par rapport à notre époque, qui ont développé les premières spéculations théologiques, avaient soutenu des opinions analogues sur la nature. Ils ont (Homère), en effet fait de l'Océan et de Téthys les parents de la création et considéraient l'Eau comme le serment des dieux, que les poètes ont appelé le Styx, car les opinions anciennes sont les plus respectées et le serment est ce qui est respecté par dessus tout. Telle était donc l'opinion de Thalès, pour ne rien dire d'Hippon, qui par la simplicité de sa pensée ne mérite pas d'être rangé parmi eux.

Anaximène et Diogène (d'Apollonie) plaçaient l'Air avant l'Eau et le considéraient comme le principe premier des corps simples et Hippasos de Métaponte adoptait comme principe premier le Feu ainsi qu'Héraclite d'Ephèse, tandis qu'Empédocle (d'Agrigente) admettait quatre éléments, ayant ajouté comme quatrième la Terre, et soutenait que ces quatre éléments se conservent toujours et sont eux-mêmes générés, aussi bien en ce qui concerne leur nombre que leur grandeur, en se mélangeant en un seul et en se différenciant à partir d'un seul.

Anaxagore de Clazomène, plus ancien en âge qu'Empédocle mais postérieur à lui quant à ses oeuvres, disait que les principes sont en nombre infini, car généralement tout ce qui est homogène (homéomère), comme l'Eau ou le Feu n'est soumis à génération et à destruction que par combinaison ou par différenciation, autrement (ces principes) ne sont ni créés ni détruits, mais se conservent indéfiniment.

Il ressort de ces considérations que l'on pourrait supposer que la seule cause est une cause du genre qu'on appelle matériel, mais en procédant ainsi (ces hommes) ont été amenés à suivre une certaine direction et ils se sont vus obligés de rechercher plus à fond la raison pour laquelle toute création ou destruction procède d'un principe unique ou bien de plusieurs principes et à se demander comment cela peut avoir lieu ; car il n'est pas possible que le substrat se

modifié de lui-même, puisque le bois ou le bronze ne peuvent pas être cause de leur transformation respective, car jamais le bois ne se transforme en lit, ni le bronze en statue. Il faut donc chercher ailleurs la cause de ces transformations. Mais cela revient alors à rechercher cette autre cause, comme nous disions, l'origine du changement.

Ceux là donc, qui les premiers ont mené cette enquête et ont affirmé que le substrat est unique, ne se sont pas heurtés à des grandes difficultés, mais ceux d'entre eux qui ont maintenu l'existence de l'Un, en quelque sorte vaincus par cette recherche, affirment que l'Un, comme toute la nature, est invariable, non seulement par rapport à la création et la destruction (car ceci est une opinion ancienne adoptée par tous) mais aussi par rapport à toute modification. C'est là un point qui leur est particulier.

Or, parmi ceux qui maintenaient que l'Univers est Un, aucun n'a pu en pénétrer la cause, sauf peut être Parménide et ceci dans la mesure où il admet non seulement une, mais, en quelque sorte, deux causes. Mais ceux qui admettent plusieurs entités primaires (comme le Chaud et le Froid ou le Feu et la Terre) sont plus à même de fournir une explication systématique et cohérente, en considérant le Feu comme étant de nature cinétique et l'Eau, la Terre etc... comme étant de nature opposée.

Après ces chercheurs et après la découverte de ces principes, qui n'étaient pas suffisants pour donner une explication de la nature et de la réalité des objets, pressés, comme je l'ai déjà dit, par la Vérité, certains ont été obligés de rechercher un principe supplémentaire. Car, tout compte fait, il n'est pas vraisemblable et, selon toute probabilité, ils ne se contentèrent pas de dire que le Feu ou la Terre ou tout autre élément peut être la cause de l'existence et de la transformation des objets de manière satisfaisante et cohérente ; il n'était d'autre part pas permis de penser qu'une chose aussi importante était due à la génération spontanée ou au hasard.

Anaxagore, en disant qu'il existe dans la nature un Esprit, cause de l'Univers et de tout cet ordre que l'on voit, semble avoir soutenu une opinion saine, tandis que ses prédécesseurs se contentaient du vraisemblable. On sait en effet qu'Anaxagore a effectivement avancé cette raison, mais certains disent qu'Hermotimos de Clazomène l'avait formulée avant lui.

Les chercheurs ayant formulé ces idées posaient un principe des êtres, principe qui était d'une part cause de Beauté et d'autre part pouvait communiquer le mouvement à ces êtres.

On pourrait même soupçonner que ce soit Hésiode⁽⁴⁾ qui a le premier pensé à la recherche, ou bien quelqu'un d'autre, qui a posé comme principe des choses l'Amour ou le Désir, comme Parménide qui, parlant de la création de l'Univers, dit :

"Tout d'abord elle (Aphrodite) créa l'Amour, premier des dieux"
ou encore Hésiode qui dit :

"D'abord naquit le Chaos, puis la large Terre,
Puis l'Amour, le premier de tous les Immortels",

tout comme s'il était absolument nécessaire qu'il y ait dans le monde une certaine cause, qui provoque le mouvement et la combinaison.

On pourrait peut-être remettre à plus tard la classification de ces penseurs par ordre de priorité. Pour le moment, puisqu'il semble que la nature contenait aussi les opposés de l'Ordre et de la Beauté, donc le Désordre et la Laideur, et que les choses mauvaises sont plus nombreuses que les bonnes et les laides plus nombreuses que les belles, disons qu'un autre, Empédocle, a introduit comme causes additionnelles l'Amitié et la Haine. En effet, si l'on adopte et on suit la pensée et non le langage obscur d'Empédocle, on déduirait que l'Amitié est la cause des bonnes choses et la Haine des mauvaises, de sorte qu'il serait d'un certain point de vue plus correct d'affirmer qu'Empédocle a dit, et il a été le premier à le dire, que le Bien et

le Mal sont des principes premiers, puisque la cause de tout Bien est le suprême Bien lui-même.

Ces penseurs, disais-je, et jusqu'à Empédocle, semblent donc avoir conçu les deux causes, que nous avons définies dans la Physique, la cause matérielle et la cause du mouvement, mais d'une manière assez vague et sans précision ; tout comme les soldats mal entraînés, qui dans la bataille se ruent sur l'ennemi en lui portant des coups décisifs sans faire preuve de science, ces penseurs ne semblent pas avoir eu une connaissance profonde de leur science, car souvent ils n'en font usage que pour en tirer partie très partiellement.

Ainsi Anaxagore utilise l'artifice de l'Esprit pour la mise en ordre de l'Univers, mais quand il se heurte à des difficultés quant à sa nécessité, il le retire. De même, d'autres fois, il fait intervenir, pour l'explication des faits, tout autre chose. De son côté Empédocle fait un usage plus étendu des causes, mais d'une manière insuffisante et pas toujours cohérente ; souvent en effet chez lui, l'Amour différencie et la Haine combine (contrairement à son hypothèse), puisqu'aussitôt que l'Univers est complètement différencié en ses éléments par la Haine, le Feu et chacun des autres éléments s'agglomèrent en un tout, et de nouveau quand ils sont amalgamés par l'Amour, il lui semble indispensable de faire intervenir la Haine pour différencier les parties de chacun.

Empédocle donc le premier parmi les premiers a introduit la dichotomie de la cause, en faisant du principe du mouvement non pas une seule cause mais deux et celles-ci différentes et opposées. Il est aussi le premier à avoir dit que ce qu'on n'appelle les éléments matériels sont au nombre de quatre ; néanmoins, il ne les emploie pas tous les quatre, mais fait comme s'ils n'étaient que deux seulement, en traitant le Feu à part, puis les contraires (Terre, Air et Eau) comme s'ils n'en faisaient qu'un seul. C'est du moins ce qu'on lit dans ses poèmes. Voilà donc en ce qui concerne Empédocle.

Leucippe et son élève Démocrite disent que les éléments

sont le Plein et le Vide et ils appellent le premier l'Etre, le second le Non-être, en identifiant l'Etre avec tout ce qui est plein et solide et le Non-être avec tout ce qui est vide et raréfié (c'est pour cela qu'ils ne précisent pas si l'Etre existe à plus forte raison que le Non-être, ni le vide à plus forte raison que les corps) ; ils disent de plus que ce sont précisément les causes matérielles des réalités physiques. Tout comme ceux qui conçoivent l'Un comme le substrat passif à partir duquel tout prend naissance par transformation, en postulant la raréfaction et la densité comme principes premiers de toute modification, de la même façon Leucippe et Démocrite disent que ce sont les Différenciations (= les atomes) qui sont les causes de toute chose. Ils précisent d'ailleurs que ces Différences sont au nombre de trois : forme, ordre et orientation (spatiale) ; en effet, disent-ils, les objets existants diffèrent seulement par leur Contour, leur Contact mutuel et leur Orientation. Le contour n'est autre chose que la forme, le contact mutuel est l'arrangement (des atomes) et l'orientation est leur position dans l'espace. Ainsi A diffère de N par la forme, AN diffère de NA par l'ordre et H diffère de H par l'orientation. Quant au mouvement (d'où vient-il ? pour quelle raison ?), tout comme les autres philosophes, ils l'ont occasionnellement négligé. Telle semble avoir été l'ampleur des spéculations des philosophes antérieurs en ce qui concerne ces deux genres de causes.

En ces mêmes temps et même un peu auparavant, ceux qu'on appelle les Pythagoriciens se sont appliqués aux mathématiques et pénétrés de celles-ci ils sont arrivés à la conclusion que ce sont les principes mathématiques qui sont à l'origine de toutes choses. Comme ils considéraient les nombres comme étant par nature les premiers des principes et voyaient en eux des représentations des êtres et des phénomènes (plutôt que dans le Feu, la Terre et l'Eau) ils appelaient telle propriété d'un nombre la justice (le nombre 4), telle autre l'Ame ou l'Esprit (le nombre 1), telle troisième l'Opportunité (le nombre 7) et ainsi de suite en toutes choses. Comme d'autre part, ils avaient reconnu que les propriétés et les rapports de l'échelle musicale sont basés sur les nombres et qu'il leur semblait parfaitement clair que

toutes les autres choses sont entièrement modelées sur les nombres, qui sont les objets ultimes de la réalité physique, ils en concluaient que les principes des nombres sont les éléments de toute chose et que tout l'Univers n'est qu'Harmonie et Nombre (le nombre 10 = 1 + 2 + 3 + 4, tétractys). Ainsi ayant rassemblé tout ce qui était mathématiquement démontrable axiomatiquement pour les nombres et les proportions, ils en ont fait l'application à l'explication des phénomènes de l'Univers tout entier ou de ses parties, et de l'ensemble de l'ordre céleste ; si une contradiction quelconque se présentait ils se pressaient d'y remédier pour rendre l'ensemble de la doctrine plus cohérent. Je m'explique : comme la décade semble être parfaite et englobe toutes les propriétés essentielles des nombres, ils disent que les planètes aussi sont au nombre de dix, mais comme on n'en observe que neuf, ils en introduisent comme dixième l'Anti-terre. De tout ceci nous en avons parlé plus en détail en temps et lieux ; l'objet de notre présente enquête se limite à la découverte de leurs postulats et de la façon dont ils les incorporent aux causes dont nous venons de parler. De ce point de vue, ils semblent considérer le nombre comme principe premier, aussi bien matériel et constitutif des êtres qu'en tant que propriétés et relations ; comme éléments du nombre ils posent le pair et l'impair, le pair étant le limité et l'impair l'illimité, l'unité elle-même participant des deux (puisque'elle est à la fois paire et impaire) et les nombres dérivant de l'unité ; les nombres, comme nous l'avons déjà dit, constituent tout l'Univers visible.

D'autres de cette même Ecole admettent que les principes sont au nombre de dix et les énoncent suivant la suite naturelle des nombres, de la manière suivante :

Un	Limité et Illimité
Deux	Pair et Impair
Trois	Unité et Multiplicité
Quatre	Droite et Gauche
Cinq	Mâle et Femelle
Six	Repos et Mouvement
Sept	Droit et Courbe
Huit	Lumière et Obscurité
Neuf	Bien et Mal
Dix	Carré et Rectangle

Probablement Alcmaion de Crotona a raisonné de la même façon, soit qu'il ait emprunté à eux cette manière de concevoir les choses, soit eux à lui, car Alcmaion vivait du temps où Pythagore était âgé, mais il s'est exprimé d'une manière analogue. Il dit en effet que dans la plupart des cas les choses humaines vont par paires, en entendant par là les contraires, non pas bien définis comme chez eux (comme le Blanc et le Noir, le Doux et l'Amer, le Bien et le Mal ou le Grand et le Petit), mais pris au hasard. Ainsi, Alcmaion a parlé d'une manière vague des autres contraires, tandis que les Pythagoriciens se sont prononcés et sur leur nombre et sur leur détermination. De tous ces philosophes, il nous faut retenir que ce sont les contraires qui constituent les principes des choses ; des Pythagoriciens, nous retiendrons les nombres et leurs déterminations. Comment convient il de classer ces causes, cela n'a pas été exprimé clairement par eux, mais il semble bien qu'ils classent les éléments parmi les formes de la matière, puisqu'ils disent que la matière a été composée et modelée sur eux.

Par cette revue on peut pénétrer suffisamment la pensée des anciens, qui soutenaient que les éléments de la nature sont multiples ; il y en a d'ailleurs quelques-uns qui ont considéré l'Univers comme une entité unique, mais pas tous de la même façon ni quant à la formulation, ni quant à la compatibilité avec les phénomènes de la nature. Pour le but de notre exposé l'entrée dans les détails de leur enseignement importe peu, car tout en supposant une unité primordiale, comme certains des physiologues, ils ne génèrent pas l'Etre à partir de l'unité en tant que principe matériel, mais par un processus différent ; ils ajoutent en effet le mouvement pour expliquer la création de l'Univers, tandis que les autres postulent que l'Univers est immobile. Néanmoins bien des choses sont importantes pour notre présente enquête. Il semble que Parménide ait conçu le raisonnement de l'Un et Mélistos celui de l'Un matériel, d'où le premier soutient que l'Un est fini, tandis que le second le conçoit comme infini. D'autre part Xénophane le premier (ne dit-on pas qu'il fut élève de Parménide ?) ayant voulu concilier les deux points de vue, n'a pas été capable d'expliquer quoi que ce soit, et ne semble pas avoir pénétré le fond de ces conceptions, mais, ayant fixé son attention sur l'ensemble du

Ciel, il a dit que l'Un est le dieu. Laissons donc de côté leurs opinions pour le moment, car Xénophane et Mélistos peuvent être complètement ignorés, ayant des vues très naïves, mais pourtant Parménide semble avoir parlé avec quelque pénétration ; en adoptant, comme il le fait, que le Non-Etre n'est rien par opposition à l'Etre, il suppose nécessairement que l'Etre est Un et qu'il n'existe rien d'autre (ce que nous avons discuté en détail dans la Physique), mais, étant obligé de prendre en considération les phénomènes, il pose à son tour deux causes et deux principes, le Chaud et le Froid, en d'autres termes le Feu et la Terre ; il classe alors le Chaud parmi les Etres et l'autre parmi les Non-Etres.

Telles sont donc les informations qui nous sont parvenues, d'après ce qui précède, par la considération des opinions des savants antérieurs : des premiers philosophes nous avons appris que les principes premiers sont corporels (= matériels), comme l'Eau et le Feu et les corps similaires, les uns adoptant une seule cause matérielle, les autres plus d'une, mais tous s'accordant à considérer ces principes comme strictement matériels. Il est vrai que d'autres ajoutent à cette cause celle de l'origine du mouvement, que quelques-uns supposent être une seule et d'autres deux. Jusqu'aux Italiens donc, ceux-ci mis à part, les autres philosophes se sont exprimés d'une manière assez vague à ce sujet ; néanmoins, comme nous l'avons dit, ils font actuellement usage de deux principes, dont l'un (l'origine du mouvement) est considéré par les uns comme étant Un, par les autres comme étant deux causes différentes. Par contre les Pythagoriciens ont de même soutenu qu'il existe deux principes, tout en ajoutant (ce qui leur est particulier) que le Fini et l'Illimité ne sont pas des entités séparées et distinctes, comme le Feu ou l'Eau ou tout autre élément, mais que l'Illimité en soi et l'Un en soi constituent effectivement l'essence des choses dont on fait les prédicats. D'où la raison pour laquelle ils disent que l'essence de toute chose est le nombre.

Ainsi donc se sont-ils exprimés et ils ont même commencé à conjecturer du qu'est-ce ; mais ils ont traité de la question d'une manière simpliste. En effet leurs définitions étaient superficielles en ce sens qu'ils pensaient que l'essence de la chose est ce à quoi la

définition s'applique en tout premier lieu, tout comme si l'on pouvait soutenir que double et dyade est exactement la même chose du fait que 2 est le premier nombre qui est le double d'un autre. Or cela n'est peut-être pas la même chose, je veux dire, qu'un nombre soit double d'un autre ou que ce nombre soit le nombre 2, autrement une chose serait plusieurs, une conséquence à laquelle il leur arrivait d'aboutir.

Voici donc ce qu'il faut retenir des philosophes antérieurs.

Après les philosophies décrites a paru l'investigation platonicienne, qui s'accordait avec elles sur plusieurs points, mais avait quelques particularités distinctes de la doctrine italique. En effet Platon jeune a fréquenté Cratyle et a connu les doctrines d'Héraclite, à savoir que toutes les choses sensibles sont en perpétuel écoulement et qu'il n'en existe pas une connaissance scientifique, une opinion qu'il a soutenu lui-même par la suite. Quand Socrate , qui ne s'intéressait qu'aux questions morales et absolument pas aux choses de la nature, recherchant les universaux, a le premier concentré son attention sur la question des définitions, Platon l'a suivi et a admis que les définitions ne concernent pas les choses matérielles mais des entités d'une autre espèce ; il était en effet impossible de donner une définition générale d'un objet matériel en perpétuelle transformation. Platon appelait ces objets des Idées et pensait que les objets sensibles tirent leurs noms des Idées et que l'on ne peut en parler qu'en relation avec elles, car les objets multiples semblables aux Formes n'existent que par participation à celles-ci (il n'a d'ailleurs fait que changer le nom, puisque les Pythagoriciens disaient que les objets existent par imitation des nombres et Platon a dit par participation au lieu d'imitation ; quant à savoir ce que peut bien signifier participation ou imitation, ils ont laissé la question ouverte). De plus Platon dit qu'entre les objets sensibles et les Formes il existe des objets mathématiques intermédiaires, qui sont différents des objets sensibles du fait qu'ils sont éternels, immobiles et différents de Forme, en ce sens qu'il existe plusieurs objets mathématiques semblables, tandis que la Forme est en soi unique.

Alors, les Formes étant la cause des autres êtres, Platon a

admis que les éléments des Formes sont aussi les éléments des Etres ; ainsi en ce qui concerne la matière, le principe en est le Grand et le Petit et l'essence (= la principe formel) est l'Un, puisque ce n'est que par participation à l'Un que les nombres dérivent du Grand et du Petit. Quant à l'essence de l'Un il disait, d'une manière analogue à celle des Pythagoriciens, qu'il est substance et non prédicat de quoi que ce soit d'autre, et entre autres, et en accord avec eux, il soutenait que les nombres sont les causes universelles de la substance des Etres. Mais il lui appartient en propre d'avoir fait de l'Un illimité une dyade et de l'Illimité un dérivé du Grand et du Petit. Il lui appartient de même en propre l'opinion que les nombres existent indépendamment de la réalité sensible, tandis que les Pythagoriciens disent que les objets eux-mêmes sont nombres et ne placent rien comme objets intermédiaires mathématiques. Le fait d'avoir distingué l'Un et les nombres des objets sensibles, contrairement aux Pythagoriciens, et d'avoir introduit les Idées, est dû à ses recherches sur la Logique (les philosophes antérieurs ne connaissaient pas la Dialectique), tandis que l'introduction de la dualité a trait au fait que tous les nombres, sauf les deux premiers, peuvent facilement être générés à partir de la dyade, comme à l'aide d'une matrice. Or cela n'est pas évident, car il peut en être autrement. En effet, ils (les platoniciens) génèrent toute multiplicité de la matière, tandis que la Forme ne produit qu'un seul exemplaire, puisque de toute évidence d'un morceau de bois on ne peut construire qu'une seule table ; tandis que celui qui ajoute la Forme, même s'il est seul, il peut construire plusieurs tables. Il en est de même des contraires Mâle-Femelle, puisque la Femelle est remplie en un seul acte, tandis que le Mâle peut remplir (= fertiliser) plusieurs Femelles. Mais tout cela n'est qu'imitation des principes exposés.

En ce qui concerne donc notre recherche, Platon s'est exprimé de cette façon. Or, il est clair de ce que nous venons de dire, qu'il n'utilise que deux causes seulement : celle de l'essence (= qu'est-ce ?) et celle relative à la matière (car les Formes sont les causes de l'essence des autres objets et l'Un est la cause essentielle des Formes) ; il est vrai qu'il précise aussi qu'elle est la matière-substrat dont les Formes sont les prédicats dans le cas des objets sensibles et

que l'Un est dit des Formes, comme, par exemple, qu'il s'agit de la dyade du Grand et du Petit. Il a de plus assigné à chaque élément respectivement la cause du Bien et du Mal, question qui a été considérée, comme nous l'avons dit, par quelques philosophes antérieurs, comme Empédocle et Anaxagore.

Aristote se livre ensuite à une impitoyable critique de ses prédécesseurs en disant que personne n'est allé au fond du problème, et encore moins les partisans des Idées. Nous l'abandonnons donc à ce point pour retourner directement à Platon, non pas en prétendant donner une explication quelconque de la difficile théorie des Idées, mais pour puiser directement ses idées en ce qui concerne notre sujet, et cela d'autant plus que le fondateur de la Mécanique Quantique y a souvent attiré l'attention⁽⁵⁾.

Le point de départ de Platon est le phénomène le plus frappant de la nature, à savoir celui du mouvement diurne ; sa Physique est donc et en tout premier lieu une Cosmogonie, telle qu'elle se trouve exposée principalement dans le Timée, un des dialogues les plus difficiles et souvent très mal traduit⁽⁶⁾.

L'univers platonicien, qu'il s'agisse de la sphère des étoiles fixes ou de celles des planètes, est un Etre vivant créé sans aucun doute, puisqu'il est "visible, tangible et corporel", par le meilleur des artisans (Dieu) à l'image d'un "modèle éternel" intelligible et toujours identique à lui-même et grâce à sa suprême bonté. Pour cela, il (le dieu) a rassemblé tout le matériel visible imparfait et stable ou en mouvement perpétuel et désordonné et il l'a ramené du Désordre à l'Ordre jugeant celui-ci meilleur que celui-là. Ayant réfléchi, il a trouvé qu'il fallait le douer d'une Ame (car rien n'est beau s'il est dénué de raison et la raison n'existe pas sans l'âme) ; il a alors mis la raison dans l'âme et l'âme dans le corps et il a modelé le tout afin d'en faire la plus belle et la meilleure des créatures "ce Ciel unique, engendré, existant et qui continuera à exister à jamais". Les matériaux de construction étaient, bien sûr, le Feu et la Terre, mais il fallait aussi un liant pour cimenter le tout ; il a donc intercalé l'Eau et l'Air (les quatre racines d'Empédocle) et il a mélangé le tout suivant une proportion continue à rapport unique :

$$\frac{\text{Feu}}{\text{Air}} = \frac{\text{Air}}{\text{Eau}} = \frac{\text{Eau}}{\text{Terre}} = \text{Constante}$$

de manière qu'il soit indissoluble par toute autre personne que son Créateur, vivant, unique, éternel et à l'abri de toute infection. De plus il lui a donné une forme sphérique, la plus parfaite de toutes, qu'il a poli extérieurement et finalement il lui a communiqué un mouvement de rotation circulaire, sans aucune autre degré de liberté. Comme auparavant il avait placé l'Ame à l'intérieur du Corps du Monde, il la tira ensuite dans toutes les directions, afin d'en recouvrir même l'extérieur. Elle pouvait ainsi commander au corps tout entier. L'Ame elle-même a été composée de la manière suivante :

A la substance indivisible et toujours identique à elle-même et à la substance matérielle constitutive des corps et divisible, le Créateur a mélangé une troisième espèce, participant à la fois de la nature de l'une et de l'autre des deux précédentes, soit une substance ayant des propriétés intermédiaires ; puis, ce genre de matériaux étant difficiles à mélanger, il a employé la Force pour en faire une seule Idée, en harmonisant les trois matériaux en un tout unique. Ce mélange une fois homogénéisé, il a partagé le tout en un nombre convenable de parties (soit $54 = 2 \times 3^3$ parties) de la manière suivante : "il a d'abord pris une partie ($= \frac{1}{54}$) du tout, puis le double de celle-ci, ensuite les $\frac{3}{2}$ de la deuxième partie (ce qui fait le triple de la première), puis le double de la deuxième partie, puis le triple de la troisième, puis l'octuple de la première et finalement le 27uple de la première partie (ce qui fait en tout $1 + 2 + 3 + 4 + 9 + 8 + 27 = 54$ parties). Il a ensuite complété les termes qui sont dans le rapport 2 et ceux qui sont dans le rapport 3, en découpant des quantités et en les insérant entre les couples des termes consécutifs de manière qu'il y ait dans chaque intervalle deux moyens termes, à savoir une moyenne arithmétique et une moyenne harmonique ; ayant ainsi fait apparaître les rapports $3/2$, $4/3$ et $9/8$ assujettis à des contraintes (= proportions), il a comblé tous les intervalles de $4/3$ par des $9/8$, en laissant subsister de chacun une partie se présentant sous le rapport $\frac{256}{243}$. Il a ainsi consommé tout le mélange initial* .

Il s'agit maintenant, à l'aide d'un raisonnement qui sort un peu de l'habituel, d'essayer de nous rendre compte de la naissance

(= génération) de chacun de ces éléments constitutifs de l'Univers ; mais, comme vous participez à l'enseignement dispensé dans cette maison, il va de soi que vous serez à même de suivre.

Pour commencer, je pense qu'il est tout d'abord évident pour chacun de vous que le Feu, la Terre, l'Eau et l'Air sont des figures à extension spatiale et que toute extension spatiale possède, en plus de l'extension dans le plan, une troisième dimension de profondeur, qui constitue naturellement l'extension du plan, lui-même composé de triangles, selon la troisième dimension.

Or toute figure triangulaire dérive de deux espèces de triangles rectangles, ayant chacun un angle droit et deux angles aigus, mais dont l'un a des côtés perpendiculaires égaux et des angles adjacents à ces côtés valant la moitié d'un angle droit, et l'autre des côtés perpendiculaires inégaux ainsi que les angles adjacents. Posons cela comme postulat de la constitution du Feu et des trois autres corps, suivant en cela une raisonnement nécessaire et vraisemblable.

Quant à l'origine de ces éléments eux-mêmes, Dieu seul la connaît et ses élus parmi les hommes.

Il nous faut maintenant exposer quels sont les quatre plus beaux solides, d'une part dissemblables entre eux et d'autre part capables d'être générés à partir des autres par décomposition ; il nous faut, somme toute, nous attacher à agencer ensemble ces quatre espèces de corps à beauté différente et en expliquer la nature d'une manière satisfaisante.

Il est clair que parmi les deux espèces de triangles dont il a été question, l'isocèle est unique, tandis que le scalène peut avoir une infinité de formes ; par conséquent, si l'on tient à procéder avec méthode, nous choisirons parmi cette infinité le triangle le plus beau, et nous considérons comme un ami plutôt que comme un adversaire toute personne qui pourrait nous proposer quelque chose de meilleur et de plus satisfaisant pour notre recherche. Considérons donc parmi cette infinité de triangles scalènes le plus beau, en laissant de côté tous

les autres, à savoir celui qui entre dans la composition d'une troisième espèce de triangle, qui est le triangle équilatéral...

Considérons alors les deux triangles, à partir desquels le corps du Feu et des autres éléments a été constitué :

a) le triangle rectangle et isocèle et

b) le triangle rectangle dont les carrés des côtés perpendiculaires sont dans le rapport $\frac{3}{1}$ et essayons de préciser ce que nous avons avancé d'une manière un peu vague.

Nous venons de voir que les quatre éléments dérivent les uns des autres, mais ce n'est là qu'une façon de parler, car on peut, effectivement, à partir des triangles considérés, former par une construction convenable les quatre espèces citées, à savoir : trois à partir du triangle scalène et la quatrième à partir du triangle isocèle uniquement.

Il n'est pas toujours possible de former d'une manière générale, par composition d'un grand nombre de petits solides, des solides plus grands et vice-versa, mais à partir des trois espèces considérés cela est possible ; en effet, toutes les trois étant décomposables en un constituant unique, il est toujours possible à partir d'un volume de grandes dimensions de former plusieurs de dimensions plus petites par des combinaisons convenables, ou inversement à partir de plusieurs volumes de petites dimensions dissociés en triangles élémentaires, il est possible de construire un solide unique pouvant représenter un volume d'une forme différente, mais de dimensions plus grandes .

Voilà donc ce que l'on peut dire du processus de génération mutuelle.

Venons-en à la description de la plus petite des espèces composites, ayant pour éléments des triangles rectangles dont l'hypothénuse vaut deux fois l'un des côtés perpendiculaires. En combinant

deux tels triangles suivant les hypothénuses et en répétant cette opération trois fois, de manière à ce que les petits côtés et les hypothénuses forment les rayons de deux cercles concentriques, on obtient, à partir des six triangles de cette espèce, un triangle équilatéral.

Quatre tels triangles équilatéraux combinés de façon à concourir trois par trois en un point commun, constituent un angle trièdre dont les trois angles plans de chaque sommet ont pour somme le plus grand angle obtus possible (180°), et quatre angles trièdres de cette espèce forment la première espèce de volume (= tétraèdre régulier), qui a la propriété de partager la sphère circonscrite en secteurs égaux et semblables.

Deuxièmement, à partir de ces mêmes triangles élémentaires, combinés en huit triangles équilatéraux, on peut constituer un angle tétraédrique (à angles plans valant 60° chacun), et avec deux tels angles on construit aussitôt un deuxième volume à six sommets (octaèdre régulier).

Le troisième solide est obtenu en combinant 120 triangles élémentaires en douze angles solides pentaédriques, c'est-à-dire constitués de cinq faces triangulaires et équilatérales chacun, ayant donc vingt faces triangulaires et équilatérales (icosaèdre régulier).

Nous avons de la sorte épuisé toutes les possibilités offertes par cet élément (triangle rectangle scalène).

L'autre triangle élémentaire (rectangle et isocèle) donne naissance au quatrième solide, par combinaison quatre par quatre de manière à former autour d'un même centre quatre angles droits, c'est-à-dire un carré. Six de ces carrés sont ensuite combinés en huit angles solides présentant toujours trois plans perpendiculaires entre eux. La figure ainsi construite est cubique et possède six faces carrées.

Comme il existe de plus un cinquième polyèdre régulier (le dodécaèdre), Dieu s'en est servi pour la construction de l'Univers tout entier (sphère des étoiles fixes) sur lequel il a peint les constellations .

Cela étant, quelqu'un qui réfléchirait avec application pourrait bien poser la question suivante : existe-t-il un Univers unique et limité ou bien une infinité ? Répondre par la deuxième alternative serait tentant pour une personne inexpérimentée et non parfaitement au courant de l'état actuel de la question ; hésiter entre les deux (par exemple un seul ou bien cinq univers), par contre, serait une attitude bien naturelle.

Quant à nous, le dieu nous révèle qu'il n'existe qu'un seul Univers, créé suivant la raison suffisante, mais il n'est pas exclu pour autant que quelqu'un qui partirait d'autres prémisses arrive à des conclusions différentes et tout aussi bien susceptibles de sauver les phénomènes (= en donner une explication).

Ceci posé nous allons attribuer des noms spécifiques aux espèces ainsi créées, à savoir Feu, Terre, Eau et Air respectivement.

Appelons donc Terre la forme cubique la plus stable et la plus plastique, ce qui est indispensable si cette Terre doit avoir les assises les plus stables. Or, par la nature même des choses, la forme la plus stable (constituée des triangles adoptés) est celle à côtés égaux plutôt qu'inégaux, et parmi les figures planes le carré avec ses quatre côtés égaux est certainement bien plus stable que le triangle équilatéral, aussi bien dans ses parties (les triangles élémentaires) que dans son ensemble. En attribuant donc cette figure à la Terre, nous ne faisons que nous conformer au bon sens, et par voie de conséquence on est amené à attribuer à l'Eau la figure la plus mal commode à déplacer (icosaèdre), au Feu, celle qui est transportable le plus aisément (Pyramide triangulaire), et à l'Air, la figure intermédiaire (octaèdre).

Du point de vue qualitatif, cette attribution revient à donner au Feu le volume le plus petit, à l'Eau le plus grand et à l'Air le volume intermédiaire entre les deux, ou ce qui revient au même, on nommera

Feu la figure la plus pointue, Air la suivante et Eau la moins pointue des trois.

De cette manière la figure ayant la base la plus petite sera nécessairement la plus mobile et en même temps la plus légère (puisqu'elle contient le plus petit nombre de constituants), la figure la plus coupante et la plus pointue de toutes ; la figure suivante par rapport à ces mêmes propriétés a le deuxième rang et celle d'après sera la troisième en rang.

D'autre part, il faut se représenter ces figures si menues en dimension qu'aucune n'est visible à l'oeil, vue sa petitesse ; mais il est bien entendu que si l'on en entasse un grand nombre, leur volume peut évidemment devenir visible.

Quant aux rapports auxquels obéissent leurs nombres, leurs déplacements et toutes les autres propriétés, Dieu les a réalisés suivant des proportions exactes, tout comme si la Nécessité lui obéissant de bon gré se laissa convaincre.*

Voilà maintenant comment les choses se sont passées en ce qui concerne toutes ces figures, selon toute vraisemblance : la Terre en rencontrant le Feu a été brisée par ses pointes et emportée, soit en se décomposant par le Feu, soit par collision avec des particules d'Air et d'Eau, jusqu'au moment où ses composants, en se rencontrant de nouveau par le fait du hasard et en se recombinant redonnèrent de la Terre ; il est en effet impossible qu'ils puissent former une espèce différente. Quant à l'Eau, ensorcelée par le Feu ou par l'Air, elle peut donner par recombinaison soit une partie de Feu, soit deux parties d'Air. De même, une partie d'Air peut donner par décomposition deux parties de Feu. Et réciproquement, si une particule de Feu se trouve entourée de plusieurs particules d'Air, d'Eau ou de Terre, emportée par le mouvement de l'ensemble, si, tout en se défendant, elle est vaincue et cassée en petits morceaux, alors deux particules de Feu, en se combinant, donnent une particule d'Air. De même une particule d'Air peut donner par décomposition deux particules de Feu, se combinant alors en une particule d'Air ; si par contre (dans cette collision)

c'est l'Air qui prend le dessous et se brise, deux particules et demi d'Air forment un agrégat d'une espèce solide d'Eau. D'une manière générale, un élément quelconque capté par le Feu se brise, à cause de l'acuité des angles et des forces, mais s'il parvient à se combiner au Feu son morcellement s'arrête (car toute figure semblable et identique à elle-même ne peut induire une transformation, ni en subir une autre, ni même se transformer à son tour par un autre agent possédant les mêmes éléments semblables) ; par contre un élément faible, capté par un autre plus puissant que lui, ne cesse de se décomposer durant cette lutte.

D'une manière analogue, si des éléments petits et en petit nombre se trouvent entourés d'éléments plus grands et en plus grand nombre, ils se cassent et disparaissent ; si par contre ils manifestent une volonté de combinaison avec l'élément prépondérant, ils cessent de disparaître et à partir du Feu il se forme de l'Air et à partir de l'Air il se forme de l'Eau.

Si d'autre part, certains éléments se combinent en un seul et qu'un autre les attaque, alors ils ne cessent de se subdiviser, jusqu'au moment où, en s'entrechoquant et en se recombinaut de toutes les manières possibles, ils arrivent à s'échapper sous une forme semblable, ou bien, en se soumettant, ils se recombinaut à plusieurs en un élément analogue à l'élément dominant et ainsi ils arrivent à faire bon ménage avec lui.

Dans toutes ces transformations il y a encore un changement perpétuel de position, car chaque multiplicité d'une même espèce tend à occuper la place qui lui est propre à cause d'une attraction naturelle exercée par ce lieu. Par contre les éléments qui se transforment en un autre d'une espèce différente, mais semblable à un autre élément pré-existant, sont portés par l'agitation vers le lieu occupé par l'élément auquel ils deviennent semblables...

Il nous faut encore rendre compte des différentes variétés de chaque élément et de la constitution des éléments eux-mêmes, car chaque réaction n'a pas donné naissance dès le début à un triangle d'une grandeur

bien déterminée, mais à plusieurs triangles de grandeurs différentes et en nombre aussi grand qu'il y a d'espèces de chaque classe. Voilà la raison pour laquelle les éléments, en se mélangeant entre eux et avec les autres, sont capables de produire une multiplicité infinie. C'est précisément cette variété que doivent prendre en considération tous ceux qui désirent aborder d'une manière rationnelle l'étude des objets de la nature.

Abordons maintenant la question du mouvement et du repos. Si l'on ne postule pas au départ de quelle manière ils se produisent et par quelle cause, de nombreuses difficultés surgiraient pour tout raisonnement ultérieur. Nous avons déjà parlé de certaines, mais il nous faut encore y ajouter ceci : dans l'uniformité il n'y a pas de possibilité de mouvement. S'il est en effet difficile, voire impossible, de concevoir un mobile sans moteur ou un moteur sans mobile, c'est parce que sans cela il n'y a pas de mouvement pensable ; l'uniformité du mobile et du moteur constitue une autre impossibilité. Nous postulerons donc que d'une manière générale le repos réside en l'uniformité et le mouvement en l'absence d'uniformité. Nous avons déjà traité de l'origine de l'inégalité (non-uniformité), mais sans préciser comment et pourquoi chaque élément, différencié en espèces particulières, ne s'arrête pas dans son mouvement de translation ou de rotation. Voici comment j'envisage la question : le mouvement périodique de l'Univers étant circulaire et de nature à vouloir toujours revenir sur lui-même, il entasse tous les éléments sans laisser subsister aucun vide entre eux. C'est pourquoi le Feu pénètre partout, puis l'Air, qui est au deuxième rang quant à la subtilité, puis et de la même façon les autres éléments. En effet, les corps constitués des parties les plus grandes laissent le plus de vides pendant leur empilement, tandis que ceux composés de parties plus petites laissent des vides moins grands ; ainsi dans l'entassement les corps menus sont poussés dans les interstices laissés vides par les grands. Si, par exemple, on mélangeait de petits corps avec des grands de manière à ce que ce soient les petits qui séparent les grands les uns des autres, ou inversement, l'ensemble se porterait vers le haut ou vers le bas, chacun en son lieu naturel, puisque selon la grandeur le lieu naturel change aussi de place.

Ainsi donc et pour ces raisons, le renouvellement incessant de la non-uniformité maintient constamment, aussi bien dans le présent que dans l'avenir, le mouvement incessant du Ciel.*

Nous arrêtons ici cet exposé déjà suffisamment long, que nous avons néanmoins tenu à reproduire d'une manière extensive pour les raisons citées au début.

Il en ressort clairement que le souci de l'Académie était de présenter une doctrine cohérente sur le Monde et la Vie ; c'est la définition de la Philosophie elle-même. La caractéristique la plus frappante de cette doctrine est son aspect structuraliste et hautement mathématisé, et nous avons vu Platon insister sur le rôle important que doivent jouer dans une telle théorie les considérations de symétrie. L'Univers créé par le dieu a la forme sphérique, la plus belle de toutes, dit-il, et le cercle est considéré comme la plus belle des figures planes. On peut alors se demander quel peut-être l'élément essentiel de cette "beauté", sinon la présence d'un nombre infini d'éléments de symétrie dans ces figures. Quant aux cinq polyèdres réguliers constitutifs de la matière sensible, ils constituent aussi des structures à symétrie croissante quand on passe du tétraèdre à l'icosaèdre. On voit ainsi se préciser la vision mathématique de l'Univers pythagoricien dont le légendaire instigateur n'a rien laissé d'écrit, que la phrase bien connue "tout est nombre".

Les conceptions du Lycée sur la nature ont été exposées par Aristote et ses élèves dans un ensemble d'ouvrages ⁽⁷⁾, où l'on trouve des développements, pouvant présenter encore aujourd'hui un intérêt certain, sur le temps, l'espace, et le mouvement ; mais du point de vue qui nous intéresse ici, Aristote n'a pas apporté des contributions importantes, à part la critique serrée de certaines notions considérées comme fondamentales et primaires (ne nécessitant pas définition) et qui ont une grande importance pour la philosophie en général et pour la philosophie naturelle en particulier. Nous n'insisterons pas davantage. Pour constituants de l'Univers matériel, Aristote adopta les quatre corps d'Empédocle auxquels il a ajouté l'éther**^{*}. Quant au problème de l'Etre en général on sait qu'il l'envisage sous deux aspects : potentiel et actuel. Un objet existe potentiellement s'il peut être actualisé, c'est-à-dire rendu perceptible par nos sens, ainsi la statue dans la pierre. Nous

verrons par la suite comment aussi bien la théorie platonicienne des Idées que la théorie aristotélicienne de l'existence potentielle sont revenues au centre des préoccupations des physiciens philosophes de la nature ; pour un exposé plus détaillé, il faudrait consulter les ouvrages de ces philosophes et cela nous entraînerait trop loin du but de cet exposé.

Les idées de Leucippe et de Démocrite furent ensuite reprises par l'Ecole d'Epicure et plus tard par Lucrèce dans son célèbre poème de Natura Rerum, qui constitue une source précieuse de renseignements sur les idées atomistiques des grecs. Epicure, surnommé l'inculte, pour être un autodidacte, soutenait que tout est corporel (matériel) et que rien ne peut exister à part les atomes et le vide illimité permettant leur mouvement. Ces atomes, qui sont infinis en nombre, afin d'éviter leur dilution (dispersion) dans l'infinité du vide, ne sont maintenus en place que grâce à des collisions au hasard entre eux, car, disait-il, ils sont aussi rapides que la pensée. Ce sont eux, qui, frappant nos organes, engendrent nos sensations, source de notre connaissance. Pour Epicure enfin les dieux sont plus beaux que les hommes, ils habitent plus haut et se désintéressent des affaires humaines ; ils sont eux-mêmes soumis aux lois de la Nécessité.

Parmi les successeurs d'Aristote, Théophraste a laissé une oeuvre considérable (surtout en botanique), mais c'est principalement Straton de Lampsaque (340-268), surnommé "le physicien" qui a développé la physique péripatéticienne. Straton admet l'existence du vide, car, "si le vide n'existait pas, ni la lumière ni la chaleur ni aucune autre force matérielle ne pourrait pénétrer la substance de l'eau, de l'air ou de tout autre corps. Comment, par exemple, les rayons du soleil pourraient atteindre le fond d'un récipient plein d'eau ? S'il n'y avait pas d'interstices entre les particules de l'eau et si les rayons du soleil devaient exercer une force pour passer au travers, les récipients pleins déborderaient. Si les rayons du soleil divisaient l'eau par la force ils arriveraient tous au fond du récipient, au lieu que quelques-uns sont réfléchis et quelques-uns seulement arrivent jusqu'au fond.

Straton montre encore expérimentalement que le mouvement est possible même en absence du vide ; une pierre placée au fond d'un récipient fermé change visiblement de place (tombe), si l'on renverse le récipient.

Avant de quitter l'école péripatéticienne, retenons encore (ne serait-ce qu'à titre de comparaison) la définition qu'Aristote donne de l'élément : "on appelle éléments des corps ce à quoi tous les autres corps se résolvent et qui y son présents soit potentiellement soit effectivement tout en étant eux-mêmes indécomposables en d'autres corps d'une espèce différente. Si cette définition est correcte, il est nécessaire que de tels éléments existent".⁽⁸⁾

"Ceux qui parlent d'éléments entendent par là les parties ultimes auxquelles les corps peuvent se résoudre et qui ne sont pas susceptibles de subdivision ultérieure en d'autres corps d'une espèce différente. Ainsi α et β sont les éléments de la syllabe $\beta\alpha$ "⁽⁹⁾.

Peu après la mort d'Aristote le centre de gravité de l'activité intellectuelle du monde grec se déplace en Egypte, où Ptolémée 1^{er} (un général d'Alexandre) avait fondé un nouveau royaume, et en Asie avec son correspondant Séleucos. Quelques noms suffiraient pour évoquer l'intense activité scientifique et technique de cette période : Euclide, Archimède, Eratosthène, Aristarque, Héraclide, Ctésibios, Sosistrate, Hipparque, Ptolémée, Diophante, etc... On ne peut insister davantage ici sur cette brillante civilisation aux aspects multiples, mais quelques considérations de Héron d'Alexandrie (1^{er} siècle ?) sont directement liées à notre sujet. Tout en conservant la théorie des quatre éléments, Héron montre par toute une série d'"expériences" que la nature n'a pas horreur du vide. En effet, dit-il, "parmi les philosophes les uns prétendent que le vide n'existe pas, les autres, avec lesquels il convient de se ranger, disent que par nature et en grand rien n'est vide, mais il existe un vide dispersé en petites parties dans l'air, les liquides, le feu et les autres corps... Il faut concevoir l'air en tant que corporel, mais, une fois mis en mouvement, il se transforme en souffle (esprit)... Les récipients que d'aucuns considèrent comme vides, ne le sont pas ; ils sont remplis d'air. Cet air, d'après les physiiciens (Straton ?) est composé de particules très menues, légères et pratiquement invisibles. Ainsi, si l'on verse de l'eau dans un récipient apparemment vide, de l'air, en proportion de l'eau versée, quitte le récipient. Cela se démontre ainsi : renversons un récipient vide dans l'eau en le tenant soigneusement vertical ; l'eau n'y pénètre pas, même si l'on enfonce complètement le récipient. De toute évidence l'air corporel occupe à lui seul tout le volume du récipient et empêche l'eau d'y rentrer. Mais si l'on

pratique un trou au fond du récipient, l'eau pénètre par l'ouverture pendant que l'air s'échappe par le trou. Si, par contre, avant de faire le trou, on lève verticalement le récipient, on constate que sa surface intérieure est parfaitement sèche, exactement comme avant l'immersion... Les particules de l'air sont certainement au contact les unes avec les autres, et cependant elles ne se touchent pas de toutes parts, mais il existe entre-elles des interstices vides, tout comme entre les grains de sable des plages... Par conséquent, l'air, contrairement à sa nature, si l'on applique une force, se comprime par suite de la pression exercée sur ses particules, et pénètre dans l'espace intersticiel. Si la force est supprimée, l'air revient de nouveau à son état initial, à cause de l'élasticité de ses particules".

"Il n'est donc plus possible", conclut Héron, "de maintenir contre toute évidence, que le vide n'existe pas... on peut montrer, en faisant appel à des phénomènes observables, qu'un vide continu existe effectivement ...". (10)

Nous verrons par la suite que des considérations analogues seront reprises avec la "pneumatique" ou "science des gaz" au XVII^{ème} siècle.

Pour le moment on ne peut que constater la ruine du monde antique, sanctionnée officiellement avec la fermeture de l'Ecole d'Athènes par Justinien (529). Encore faut-il lui reconnaître le mérite d'avoir su poser clairement toutes les questions de principe dans lesquels continue à se débattre la science moderne.

III - LE MOYEN AGE

Pendant les premiers siècles de l'ère chrétienne il s'opère une transformation radicale de la pensée ; les pères de l'Eglise s'attachent à concilier la philosophie grecque avec la doctrine chrétienne. Pour l'historien Josèphe et pour Clément d'Alexandrie, Platon est considéré comme un Moïse atticisant et l'on trouvera dans sa doctrine de l'Ame de l'Univers le dogme même de la Sainte Trinité. Peu à peu la philosophie devient une certaine manière de penser la foi. Durant toute la période de l'empire Byzantin on enseignera certes les auteurs anciens d'après les textes, mais uniquement pour y découvrir la sagesse antique et sans aucun effort de dépassement. Les nombreux commentateurs ont beaucoup écrit, surtout sur Platon et Aristote, mais pas un (à l'exception peut-être de J. Philopon) n'est à la hauteur des textes qu'il commente.

Le Moyen Age occidental, comme un éminent spécialiste l'écrit⁽¹¹⁾, "vit replié sur lui-même et sur son latin ; il reçoit très peu, même de Byzance ; et il ne transmet rien". Peu à peu le savoir se dégrade et finit par disparaître ; un grand empereur, comme Charlemagne, sait lire, mais pas écrire. On a oublié même la latin !

Entre temps une autre civilisation monte ; celle d'un petit peuple, qui, au contact de toutes les grandes civilisations anciennes, a su garder sa propre personnalité et développer sa propre culture. Les Arabes ont certes beaucoup appris au contact des autres peuples et en particulier des Grecs, mais ils ont aussi beaucoup ajouté. Nous ne retiendrons ici que quelques passages relatifs à notre sujet, pour faire le raccordement des idées.

Le grand philosophe Avicenne (980-1037) termine ainsi son chapitre sur les corps élémentaires de son Livre de la Science : "... Par conséquent les corps simples sont au nombre de quatre : terre, eau, air, feu. C'est d'eux que sont composés les autres corps ... Les hommes de science (c'est-à-dire Aristote et ses élèves) disent que les quatre éléments se transforment l'un en l'autre -l'eau en air et réciproquement, la terre en eau et réciproquement- et que le feu suit la même loi. Cette théorie est bien vraie... Moi-même j'ai vu de mes yeux ceci : une partie d'air clair et très pur se congelait par la force du froid et devenait nuage, lequel se transformait en neige qui tombait et l'air pur subsistait ; puis de nouveau il se congelait, devenait nuage, puis neige, sans que d'aucun lieu s'élevât une vapeur ou vînt un nuage. En ce qui est du contraire, c'est-à-dire que l'eau devient air, c'est une chose évidente. Quant à la transformation de l'eau en terre, on peut la voir aussi de ses propres yeux en certains lieux où l'eau pure et claire, tombant sur terre, se transforme aussitôt en pierre. Quant à la fusion de la pierre en eau, les gens qui se piquent d'Alchimie réalisent aisément cette fusion". (12)

On se souvient que pour Platon, la terre était le seul corps qui ne pouvait pas subir de transformation, mais pour Avicenne "la cause de ces transformations est que ces quatre éléments diffèrent par la forme, alors que leur substance et matière est une ; et pour celle-ci nulle forme n'est préférable à une autre ; elle reçoit tantôt l'une, tantôt l'autre, selon la cause qui intervient... Donc, chacune de ces quatre sortes de corps possède une nature par laquelle elle est telle ; et cette nature est sa forme. Autre est la nature du feu, autre celle de l'eau, autre celle de l'air, autre celle de la terre. Leurs qualités sont des accidents qui procèdent de cette nature et de cette forme ; et la preuve en est que les corps grandissent ou rapetissent ; par exemple, le moût s'enfle dans l'outre au point qu'il la déchire ; l'eau se dilate dans la cruche (chauffée) au point de la briser. Il serait absurde que quelqu'un dise : le feu est entré là-dedans au point de n'y pouvoir tenir ; il ne peut y entrer qu'à condition que quelque chose en sorte ; et quand cette entrée et cette sortie se balancent, il est impossible que le récipient se brise. Il serait donc absurde de dire : le feu a fait violence parce qu'il cherchait à s'échapper par le haut et il a brisé le récipient. En effet soulever le récipient du lieu où il a été placé est maintes fois plus facile que de le briser ou le

déchirer ; il faudrait donc que le récipient se soulevât et non qu'il se brisât ; mais la cause en est que le corps grossit de telle sorte qu'il s'étend de toutes parts et qu'il exerce pression sur le récipient, jusqu'à ce que celui-ci, devenu trop faible, éclate tantôt d'un côté tantôt de l'autre, quand il n'y a pas opposition et force en sens contraire... Le feu pur n'a ni clarté ni couleur, mais il a couleur là où il se mêle à la fumée dense ; c'est alors qu'il devient fumée lumineuse, sans plus être substance ignée... "Dans le feu de la lampe, là où le feu est le plus fort, il n'y a ni couleur ni clarté ; c'est vraiment comme s'il y avait un trou ; tu croirais qu'il n'y a point là de feu et que le feu s'est détaché de la mèche ; et tu dirais qu'il y a là du vide ou de l'air ; mais, en réalité, c'est là que le feu est le plus fort."⁽¹²⁾

Un siècle après Avicenne, ce sera Avéroës (1126-1198), le commentateur par excellence (d'Aristote), qui donnera l'accent à la philosophie. Il fut interdit (avec Aristote) au XIII^e siècle, mais il a beaucoup influencé par la suite l'Ecole de Padoue.

De toute façon la doctrine des quatre éléments se propage tout au long du Moyen Age et, à travers la Renaissance, se prolonge, avec des modifications mineures, jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. Pratiquement aucune idée nouvelle sur la constitution de la matière ne se fait jour pendant de longs siècles, à l'exception de quelques idées alchimiques issues d'une interprétation un peu particulière de la philosophie grecque.

IV - L'AVENTURE ALCHIMIQUE

L'Alchimie, dont il faut, semble-t-il, chercher les origines dans les plus anciennes civilisations de l'Asie et de l'Egypte, aurait été révélée aux prêtres égyptiens par Hermès-le-Très-Grand (Trismégiste), d'où son nom de "philosophie hermétique". A l'époque ptolémaïque les alchimistes n'hésitent pas à se proclamer les continuateurs de toutes les Ecoles grecques depuis Thalès jusqu'à Aristote. D'après eux l'Iliade, les Métamorphoses d'Ovide, l'Apocalypse de St Jean doivent être interprétés en termes alchimiques, et Moïse, qui a réduit en cendres le veau d'or, serait aussi un alchimiste.

D'après la tradition, Hermès Trismégiste aurait écrit pas moins de 20.000 volumes, contre 3000 pour le célèbre alchimiste arabe Geber (Jabir ibn Hayyam) et 226 seulement pour Rhazès. La Table d'Emeraude trouvée dans le tombeau d'Hermès contient les quatre éléments classiques, Soleil (feu), Lune (liquide), Vent (air) et Terre que les alchimistes ont groupé sous le vocable commun de Tétrassomia.

Il n'est d'ailleurs pas impossible que le célèbre alchimiste grec Chémès ou Chymès, continuateur de Parménide (?) ait donné son nom à la Chimie (Chymie). Il pensait que "le tout est un et de l'un dérive le tout, car, si le tout ne le contenait pas, il ne serait rien" (Olympiodore).

L'unicité de la matière, représentée par le serpent ourobores (qui

mange sa queue) est une interprétation de la philosophie de Platon et d'Aristote dont les écrits seraient allégoriques ; se nourrissant de son propre dépérissement, l'ourobore change continuellement de forme en passant par la tétrassomia, d'où l'appellation de "cycle de Platon" donnée à ce changement périodique et réversible des corps, qui finit par transformer tout métal vulgaire en or (chrysopée) ou en argent (argyropée), sous l'influence du soleil, des astres et de leurs effluves : "le Soleil produit l'or, la Lune l'argent, Saturne le plomb et Mars le fer".

Le corps du serpent représente la "matière primitive", unique constituant de tous les corps qui seraient identiques entre-eux, en absence de la Forme, qui les différencie ; il suffirait donc de modifier convenablement cette forme pour transformer tout corps en tout autre et par conséquent en or... C'est justement ce qui se passe aux entrailles de la Terre sous l'action du Soleil, car la Nature tend toujours à la perfection : Comme le blé engendre le blé et l'homme engendre l'homme, de même l'or engendre l'or". Pour réussir cette multiplication il faut néanmoins connaître "la philosophie de la pierre" qui, projetée sur un métal en fusion, sous forme de "poudre de projection", le transforme en or : c'est le grand Magistère dont J.J. Becher (1635-1682) ne donne pas moins de 1500 procédés. Une autre variante consistait à fabriquer l'élixir de longue vie ou or potable, une solution capable de transformer "le vieillard ramolli en jeune homme plein de désirs".

Pour la fabrication de la pierre philosophale l'alchimiste procède par voie sèche, rapide mais dangereuse, ou bien par voie humide, plus lente ; il commence ces opérations au solstice du printemps dans "l'oeuf philosophique", ancêtre de nos ballons, hermétiquement fermé, qu'il place dans le four "athanor" pour provoquer le "mariage philosophique" par une chaleur réglée suivant l'Art que seuls les adeptes connaissent. Les différentes opérations, calcination, sublimation, distillation, dissolution, etc sont strictement réglementées et leur conduite est tenue secrète. Le temps d'accomplissement de l'Oeuvre est habituellement assez long, de sorte que la mort peut surprendre l'alchimiste avant la fin du Magistère, mais nombreux sont, semble-t-il, ceux qui y sont parvenus, à en juger par les nombreux témoignages et certificats de conformité ; des médailles et de la monnaie ont été battus avec de l'or alchimique, plus fin que l'or ordinaire !

Par l'intermédiaire des Arabes et des Byzantins qui l'ont beaucoup pratiquée, l'Alchimie passe en Europe, où elle n'a pas tardé à trouver de nombreux adeptes. La "divine métamorphose" y est largement pratiquée jusqu'à la fin du XVII^{ème} siècle et l'on trouve au frontispiece de La Toison d'Or ou Fleur des Trésors de S. Trismosin (Paris 1613) la signification du mot vitriol (acide sulfurique) : Visita Interiora terrae rectificando invenies occultum lapidem.

Le célèbre alchimiste arabe Jabir ibn Hayyam (Geber) avait même tenté de développer une Alchimie mathématique à l'aide des carrés magiques donnant le nombre parfait 28, qui est le nombre de l'or.

Si Albert le Grand (1200-1280) n'a pas réussi la transmutation, il n'en était pas moins convaincu de sa possibilité. Arnauld de Villeneuve (1240-1311) et Raymond Lulle (1235-1315) étaient des alchimistes de grande réputation ; voici comment ce dernier décrit la fabrication de l'élixir des sages.

"Pour faire l'élixir des sages, mon fils, il faut prendre le mercure des philosophes (plomb) et le calciner jusqu'à ce qu'il se transmute en lion vert (oxyde de plomb nommé massicot) ; et après qu'il aura subi cette transformation tu le calcineras davantage et il se changera en lion rouge (minium). Fais digérer au bain de sable ce lion rouge avec l'esprit aigre des raisins (acide acétique), évapore ce produit et le mercure se prendra en une espèce de gomme qui se coupe au couteau (acétate de plomb) ; mets cette matière gommeuse dans une cucurbite luttée et dirige sa distillation avec lenteur. Récolte séparément les liqueurs qui te paraîtront de divine nature. Tu obtiendras un phlegme insipide, puis de l'esprit et des gouttes rouges. Les ombres cymériennes couvriront le cucurbite de leur voile sombre, et tu trouveras en son intérieur un véritable dragon, car il mange sa queue (plomb finement divisé qui s'enflamme au contact d'un charbon allumé donnant du massicot dont une partie se recombine avec l'acide acétique et se dissout). Prends ce dragon noir, broie-le sur une pierre et touche-le avec un charbon rouge ; il s'enflammera en prenant bientôt une couleur citrine glorieuse ; il reproduira le lion vert. Enfin, mon fils, rectifie soigneusement et tu verras paraître l'eau ardente (acide pyroacétique) et le sang humain"⁽¹³⁾.

Si le langage de Lulle est à peu près compréhensible, il n'en est pas toujours ainsi avec les nombreux écrits alchimiques, écrits à dessin dans un langage ésotérique, afin d'être impénétrables aux non-initiés.

On a dit, à juste titre, que les alchimistes ont développé, et cela depuis l'antiquité, tout un symbolisme chimique, mais ce n'est là qu'une façon de parler, car les symboles alchimiques ne servent pas, on s'en doute, à écrire des réactions chimiques. On les retrouve, plus ou moins modifiés, jusqu'au XVII^{ème} siècle, tabulés dans les livres de chimie, mais ils ne sont pas toujours utilisés dans les buts que nous leur attribuons.

Quelles que soient nos idées actuelles sur l'alchimie, il n'est pas moins vrai qu'elle a été jusqu'à Lavoisier la seule "philosophie chimique", la chimie naissante n'étant qu'une "chimie vulgaire".

Le grand chimiste hollandais Boerhaave (1668)1738) a rendu un juste hommage à la contribution des alchimistes au développement de la chimie moderne par leurs découvertes durant les recherches de la pierre philosophale, mais il serait excessif de croire que la chimie est sortie toute armée des alambics des alchimistes, car ils gardaient bien leurs secrets et leur appareillage est resté figé depuis l'antiquité dans un état rudimentaire, sans avoir subi d'évolution sensible.

Vers le début du XVI^{ème} siècle, l'alchimie s'engage dans une voie nouvelle, l'iatrochimie, avec le célèbre Paracelse (Theophrastus Bombastus von Hohenheim, 1493-1541) qui s'intéresse moins aux transmutations qu'aux vertus médicales des différents corps. Paracelse adopte toujours les quatre éléments, mais il considère que trois corps primaires (tria prima), le sel, le soufre et le mercure, entrent dans leur composition, trois principes, dont il existe plusieurs espèces et qui donnent aussi naissance aux sept métaux, toujours associés aux sept planètes, depuis la plus haute antiquité. Il invente le fameux alkaest (all-Geist ?), sorte d'esprit universel qui "agit très efficacement sur le foie" et que J. B. van Helmont (1577)1644) transformera en un solvant universel, pouvant tout dissoudre, "comme l'eau chaude dissout la glace". Aux frontières de l'alchimie et de la chimie, van Helmont, "le philosophe par le feu", ne semble pas se soucier dans quelle sorte de récipient il va falloir conserver son terrible solvant. Voulant,

comme autrefois Thalès, expliquer la formation de l'univers à partir de l'eau, il vérifie à la balance que les 164 livres de bois, de branches et de racines d'un saule planté, viennent uniquement de l'eau d'arrosage, par l'action d'un agent initialement présent dans la semence, un esprit "inconnu, invisible, impossible à enfermer dans un récipient", auquel il donne le nom de gaz (ghoast).

Van Helmont constate encore, et c'est une découverte importante, que la calcination de différentes substances peut donner des gaz différents, comme le gaz carbonicum (CO), les gaz sylvestres (CO₂, NO) et le gaz pingue (méthane). L'esprit vital qui maintient la vie, est aussi un gaz. D'après les nombreuses expériences de van Helmont, "tous les corps, qu'on a cru être des mixtes, de quelque nature qu'ils puissent être, opaques ou transparents, solides ou liquides, semblables ou dissemblables (pierres, soufre, métal, cire...) sont matériellement composés de l'eau simple et peuvent être totalement réduits en eau insipide, sans qu'il y reste la moindre chose de terrestre... L'eau est la seule cause matérielle des choses créées, comme il appert en leur dissolution par l'alkaest, qui réduit tous les corps, aussi solides qu'il soient, en eau". L'air est aussi considéré comme un élément, mais il ne peut pas se transmuter en eau et il n'entre pas dans la composition des mixtes ; il se mélange seulement avec un grand nombre de substances aériformes, les gaz.

Van Helmont est un contemporain de Descartes et on pourrait penser qu'avec lui c'est aussi la fin de l'alchimie, mais il n'en est rien. L'alchimie continue à exercer pendant longtemps encore un attrait certain (au moins jusqu'à Lavoisier) ; elle compte même de nos jours des "adeptes" pratiquant "l'Art sacré" avec une égale ferveur. Newton et Boyle l'ont pratiquée de leur côté et Leibnitz, aux dires de Fontenelle, faisait partie d'une société secrète de chimistes. Dalton lui-même appartenait à la compagnie des Rose-Croix. Pendant tout le XVIIème siècle il n'était pas considéré comme incongru de s'occuper d'alchimie. J. Price, membre de la Royal Society, est peut-être un des derniers alchimistes resté célèbre par sa mort tragique dans le laboratoire de cette société, dans l'impossibilité de reproduire sa transmutation (1784).

V - LA RENAISSANCE ET LE GRAND SIECLE

Par suite d'une série de découvertes et d'inventions inconnues de l'antiquité (celle de l'imprimerie jouera un rôle de tout premier plan) et fortement encouragée par la Réforme, une profonde modification dans la manière de penser s'opère vers la fin du XVème siècle. Contrairement à l'esprit scolastique, on admet de moins en moins des vérités d'autorité, que ce soit celle d'Aristote ou de l'Eglise, un esprit plus critique règne et la méthode expérimentale dont F. Bacon fut, pour ainsi dire, le théoricien, est appliquée par Galilée à l'étude des phénomènes de la nature, dont le livre est écrit dans un "langage mathématique".

En retard sur la Renaissance littéraire, la Renaissance scientifique débute avec les sciences mathématiques et les disciplines qui s'y rattachent (astronomie, mécanique, optique), mais c'est surtout en astronomie que des grands bouleversements s'opèrent avec Copernic (1473-1543), Ticho-Brahé (1546-1601), Kepler (1571-1630) et Galilée (1564-1642). La physique scolastique est abandonnée peu à peu en faveur d'une physique expérimentale, tandis que la chimie, engagée dans l'impasse alchimique n'enregistre que de faibles progrès.

La constitution des sociétés savantes (Accademia dei Lincei, Accademia del Cimento, Royal Society, Académie des Sciences de Paris...) constitue un catalyseur puissant pour le développement de la nouvelle "philosophie naturelle", qui ne reconnaît d'autre autorité en matière de connaissance scientifique, que la démonstration expérimentale et la libre discussion des résultats devant les savants réunis ; la critique devient la pierre de touche de toute découverte.

L'amalgame des idées anciennes et de la philosophie médiévale s'écroule devant la "révolution scientifique" et la hardiesse de la pensée nouvelle qui ouvre des horizons insoupçonnés à des spéculations d'une ampleur sans précédent.

Vers le début du XVIIème siècle en France deux philosophies nouvelles s'affrontent : celle de Descartes (1596-1650) et celle de Gassendi (Gassem ou Gassend, 1592-1655).

Passionné de Géométrie, Descartes invente un Univers mécanique parfaitement géométrisé. Il déclare, dans ses Principes de Philosophie :

"Que ce n'est pas la pensanteur, ni la dureté, ni la couleur, etc, qui constituent la nature des corps, mais l'extension seule (II.4).

"Qu'il ne peut y avoir aucun vide au sens que les philosophes prennent ce mot (II.16).

"Qu'il ne peut y avoir aucuns atomes ou petits corps indivisibles (II.20).

"Que toutes les variétés qui sont en matière dépendent du mouvement de ses parties (II.23).

"Que Dieu est la première cause du mouvement et qu'il en conserve toujours une égale quantité en l'univers (II.36).

"Mais que je soumetts toutes mes opinions au jugement des plus sages et à l'autorité de l'Eglise (IV.207)".

Pour Descartes, Dieu créa d'abord une certaine quantité de matière qu'il divisa en parties dures et sous forme de cubes, appliqués face pour face les uns contre les autres, sans laisser aucun interstice ; mais le mouvement de ces particules et le frottement provoque l'arrondissement de leurs angles en les transformant peu à peu en sphères. Comme l'a écrit plus tard d'Alembert (article ELEMENT de l'Encyclopédie) "aux éléments péripatéticiens Descartes en a substitué trois autres uniquement tirés de son imagination :

La matière subtile ou du premier élément (âme du monde).

la matière globuleuse ou du second élément, et

la matière irrégulière ou rameuse ou du troisième élément".

Une hypothèse de tourbillons dans une mer de particules flottant

comme des bouchons de liège sur l'eau, explique aussi bien le mouvement de ces particules que le mouvement des planètes.

Newton dira plus tard que "the hypothesis of vortices is pressed with many difficulties"⁽¹⁴⁾.

Pour le moment, aux idées de Descartes, le père P. Gassendi précurseur de Locke et de Condillac, oppose un épéurisme vigoureux tout en rejetant tout dogmatisme. Il a écrit une vie d'Epicure qui provoquait l'admiration du père Mersenne, en défendant la théorie atomique, mais Descartes l'accuse de matérialisme et veut interdire la publication de ses ouvrages.

"Les atomes", dit Gassendi, "sont les premières choses créées ; ils ne sont pas infinis en nombre, mais juste en nombre suffisant pour produire le monde fini que nous connaissons. Ils sont inaltérables (inamisibles) et se meuvent dans toutes les directions ; ils n'ont pas d'inclinaison. Par collision ils peuvent s'arrêter ; ils forment alors des molécules qui se combinent pour former les objets visibles".

Pour Gassendi la lumière aussi est corporelle et "Dieu a le pouvoir de faire l'univers à partir des atomes, comme il est également capable de l'illuminer en faisant tourner la terre autour du soleil, suivant l'hypothèse copernicienne".

Un des premiers qui a tenté une explications des phénomènes en termes d'atomes et de corpuscules après Gassendi est G.A. Borelli (1608-1679), membre de l'Accademia del Cimento ; comme ses atomes sont passifs, il invente des particules éthérées et vivantes (spirituosa et vivida), douées par Dieu d'auto-mouvement. Il rend ainsi compte non seulement de la gravitation, mais aussi du magnétisme, de l'électricité et du mouvement des planètes.

Mais que devenait la chimie pendant ce temps ?

P. Borel a publié en 1653 un catalogue des auteurs ayant écrit sur la Chymie ; parmi près de 4000 noms, Crollius, Béguin, Hartmann, Tachenius, Lancelot... ont laissé des répertoires de remèdes chymiques.

En effet les chimistes de l'époque sont en même temps des médecins ou des pharmaciens. N. Lémery (1645-1715), membre de l'Académie des Sciences, a publié en 1675 son Cours de Chymie, admiré de ses contemporains et traduit en plusieurs langues ; son titre est assez significatif : "Cours de Chymie, contenant la manière de faire les opérations qui ont usage dans la Médecine ... avec raisonnements sur chaque opération". L'ouvrage est divisé en quatre parties : Des Minéraux, Des Végétaux, Des Animaux, et Des Vertus des Remèdes. L'alchimie y est traitée de "Ars sine arte, cujus principium mentiri, medium laborare et finis mendicare". Lémery expose d'abord les principes de la chymie :

Le premier principe que l'on peut admettre pour la composition des mixtes est un principe universel qui, étant répandu partout, produit diverses choses selon les diverses matrices ou pores de la terre dans lesquels il se trouve embarrassé... Les chymistes ont conclut qu'il y avait cinq principes des choses naturelles, l'eau, l'esprit, l'huile, le sel et la terre, dont deux sont passifs (eau et terre) et trois actifs.

L'esprit qu'on appelle Mercure , est le premier des principes actifs qui nous paroît, lorsque nous faisons l'anatomie d'un mixte.

L'huile qu'on appelle soufre, à cause qu'elle est inflammable.

Le sel, le plus pesant des principes actifs ; on le tire ordinairement le dernier.

L'eau qu'on appelle Phlegme est le premier des principes passifs.

La terre qu'on appelle Tête morte ou damnée est le dernier des principes passifs.

L'auteur précisé que "le nom principe en Chymie ne doit pas être pris dans une signification tout à fait exacte ; car les substances à qui l'on a donné ce nom, ne sont principes qu'à notre égard et tant que nous ne pouvons point aller plus loin dans la division des corps ; mais on comprend bien que ces principes sont encore divisibles en une infinité de

parties, qui pourraient à plus juste titre être appelés Principes. On n'entend donc par principes de Chymie que les substances séparées et divisées autant que nos faibles efforts en sont capables".

Un métal est défini comme "la partie la plus digérée, la mieux liée et la plus cuite des minéraux" et il y en a sept : l'or, l'argent, le fer, l'étain, le cuivre, le plomb et le mercure, ainsi que quelques demi-métaux, comme le bismuth, le zinc, etc.

Pendant la calcination "il semble que l'étain devrait diminuer de poids, puisque le feu dissipe une partie de son soufre ; néanmoins il augmente". Et il en est de même du plomb. Pour expliquer cette augmentation "il vaut mieux rapporter cet effet à ce que les pores du plomb sont disposés en sorte que les corpuscules de feu y étant insinués, ils demeurent liés et agglutinés dans les parties pliantes et embarrassantes du métal, sans en pouvoir sortir, et ils en augmentent le poids".

Cette augmentation du poids des métaux par calcination a beaucoup occupé Robert Boyle (1627-1691) qui y a consacré plusieurs travaux (Par exemple De Ignis et Flammae Ponderabilitate), G. Homberg (1652-1715), et bien d'autres chimistes, mais H. Boerhaave (1688-1738) donne un remarquable contre-exemple : le fer, même chauffé au rouge, ne change pas de poids en se refroidissant. Mais Lémery est sceptique :

Ce n'est pas encore une chose bien établie chez les Physiciens que les corpuscules de feu ; peu d'entre-eux les admettent, parce qu'ils ne les comprennent point ; il croient que les augmentations de poids de l'étain et du plomb qui se font remarquer après leur calcination viennent de l'air qui s'est introduit dans leurs pores quand on les a retirés du feu, parce que ces matières, ayant été rendues spongieuses par le feu, elles hument l'air avec avidité, comme la chaux le fait de l'eau.

Pour les acides, les alcalis et les sels comme on ne peut pas mieux expliquer la nature d'une chose aussi cachée que celle d'un sel, qu'en attribuant aux parties qui la composent des figures qui répondent à tous les effets qu'il produit, je dirai que l'acidité d'une liqueur

consiste dans des particules de sel pointues, lesquelles sont en agitation ; je ne crois pas qu'on me conteste que l'acide n'ait des pointes, puisque toutes les expériences le montrent ; il ne faut que le goûter pour tomber dans ce sentiment : car il fait des picottements sur la langue semblables ou fort approchants de ceux que l'on reçoit de quelque matière taillée en pointes très fines ; mais une preuve démonstrative et convaincante que l'acide est composé de parties pointues, c'est que non seulement tous les acides se cristallisent en pointes, mais toutes les solutions de matières différentes faites par les liqueurs acides, prennent cette figure dans leur cristallisation. Ces cristaux sont composés de pointes différentes en longueur et en grosseur les unes des autres, et il faut attribuer cette diversité aux pointes plus ou moins aiguës des différentes sortes d'acides. C'est aussi cette différence en subtilité des pointes qui fait qu'un acide pénètre et dissout bien un mixte qu'un autre ne peut pas raréfier ; ainsi le vinaigre s'empreint du plomb, que les eaux fortes ne peuvent dissoudre... L'alcali est une matière composée de parties roides et cassantes, dont les pores sont figurés de façon que les pointes des acides y étant entrées, elles brisent et écartent tout ce qui s'oppose à leur mouvement...

Si l'alchimie est sévèrement condamnée par Lémery, son propre langage n'en est que trop imprégné. Voici par exemple comment il explique la formation des métaux :

Il faut un degré de fermentation pour la formation des métaux qui ne se trouve pas dans toutes les terres ; c'est pourquoi certaines montagnes contiennent des métaux ; mais il y en a plusieurs autres qui semblent aussi capables d'en produire, lesquelles n'en donnent point. Comme le métal est un ouvrage de fermentation, il faut nécessairement que le Soleil et la chaleur des feux souterrains y coopèrent ; ainsi on peut attribuer la génération des métaux à cette chaleur agissante sur les matières qui se trouvent dans des matrices convenables... Les métaux prennent souvent dans leur manière la figure de grands arbres, qui répandent leurs rameaux de tous côtés, d'où vient que plusieurs croient, qu'ils se nourrissent, comme les plantes et les animaux, par des suc qui coulent et circulent dans des vaisseaux qu'ils supposent être dedans... Mais quand on examine la chose de près, on conçoit facilement

que ces branches de métaux appelées veines par les Ouvriers, ne sont autre chose que des écoulements de la matière métallique par plusieurs petits canaux qu'elle se fait avant que d'être coagulée. Ces écoulements peuvent avoir été excités par la fermentation qui, faisant gonfler la matière, la contraint d'ouvrir la terre qui l'environne en plusieurs endroits où elle se répand.

Lémery n'est pas le seul de son siècle à répandre ces idées ; avant lui J. Béguin définissait la chimie comme "l'art qui enseigne à dissoudre les mixtes naturels et à les coaguler, étant dissous, pour faire des médicaments plus agréables, salubres et assurés" et E. Clave définissait l'élément comme "un corps simple qui entre actuellement dans la mixtion des corps composés et auxquels ils se peuvent finalement résoudre".

N. Lefèvre dans son Traité de Chimie (1660) trouve que la source et la racine de toutes choses, est une substance spirituelle, homogène et semblable à soi-même que les philosophes anciens et modernes ont appelée de plusieurs noms différents, substance vitale, esprit de vie, baume de vie, lumière, âme du monde, entéléchie, nature, mercure de vie... Unique en son essence, elle est triple en nomination (soufre, mercure, sel)... avec les minéraux elle devient minéral, avec les végétaux, végétal et avec les animaux, animal.

La nomenclature elle-même pose des problèmes souvent difficiles ; on parle beaucoup d'atomes, de molécules, de principes, de mixtes, etc.

Les principes sont divisés par l'illustre chimiste J.J. Becher (1635-1682) en :

a) Principes principiés ou primitifs qui ne peuvent être décomposés et sont considérés comme simples (tels les acides et les alcalis).

b) Principes secondaires résultant immédiatement de la réunion des principes primitifs.

c) Principes tertiaires, composés de principes secondaires, etc.

On appelle généralement soufre toute substance combustible et inflammable ; la terre est un principe principié possédant solidité, pesanteur et

fixité et les principales propriétés de l'élément terrestre: "Le feu, l'air et l'eau, la nature nous les offre exempts de tout mélange".

Pour Becher tout corps terreux est composé de trois terres :

la terre vitrescible qui se trouve dans les sels, les cailloux, les métaux, etc.

la terre mercurielle, propre aux métaux, et

la terre sulfureuse ou inflammable.

Avec R. Boyle, un des piliers de la Royal Society de Londres (fondée en 1660), se manifestent les premiers doutes quant à l'élémentarité des quatre corps platoniciens (qui pour Platon étaient des composés des triangles élémentaires). "Si les savants ont pu mettre l'eau et la terre en évidence, ils n'ont jamais pu découvrir" déclare son Sceptical Chymist, "comme l'a fait remarquer van Helmont, que le feu soit un être corporel... Outre cela les chimistes n'ont jamais démontré que l'air entre dans la composition des mixtes... Il n'apparaît pas que trois soit précisément et universellement le nombre des substances distinctes ou éléments, en lesquels les corps mixtes sont résolubles par le feu... et il n'est pas sûr que chaque substance homogène et distincte, séparée d'un corps à l'aide du feu, préexistait dans ce corps, comme principe ou élément".

Dans The Origin of Forms and Qualities (1666) Boyle essaye d'établir que :

1) il existe une matière universelle, commune à tous les corps, une substance étendue, divisible et impénétrable ;

2) cette substance étant par sa nature unique, la diversité des corps doit nécessairement provenir de quelque chose d'autre ; et comme il ne peut y avoir de changement dans la matière au repos, il y a nécessité de mouvement pour la discriminer, et pour ce mouvement, aussi, d'avoir des tendances variées.

La matière possède donc trois attributs : grandeur, forme et mouvement ou repos et ses parties peuvent se combiner d'une infinité de façons. Cette

matière universelle, pour Boyle, peut parfaitement être l'eau, pouvant se transformer en d'autre corps without the visible concurrence of any extraneous ingredients. Suivant cette conception, il n'y a donc rien d'incongru à ce qu'un métal puisse se transmuter en un autre, ce qui n'est effectivement no more, than that one parcel of the universal matter, wherein all bodies agree, may have a texture produced in it like the texture of some other parcel of matter common to them both. Ainsi dans un article des Philosophical Transactions (1675) intitulé An Experimental Discourse of Quecksilver growing hot with Gold, Boyle affirme que through God's blessing my trials afforded my positive proof about the year 1652.

Quant aux éléments, dont on attribue souvent une définition à Boyle, il est clair qu'il n'y croit pas beaucoup : I see not why we must needs believe that there are any primogeneal and simple bodies, of which, as of pre-existent elements, nature is obliged to compound all others. Nor do I see why we may not conceive that she may produce the bodies accounted mixt out of one another by variously altering and contriving their minute parts, without resolving the matter into any such simple or homogeneous substances as are pretended.

L'importante question de l'augmentation du poids des métaux par calcination est abordée expérimentalement par Boyle : ayant soigneusement pesé une certaine quantité d'étain, il la chauffe dans un ballon hermétiquement fermé en la maintenant en fusion pendant un quart d'heure. Après refroidissement le métal et les scories formées accusent une augmentation de poids de 23 grains. Boyle conclut que les particules de feu en quantité importante ont pénétré à travers le verre, se sont insinuées entre les pores du métal et en ont augmenté le poids.

Cela étant il ne faut pas conclure négativement quant aux importantes contributions de Boyle au progrès de la science moderne naissante.* A part ses nombreux travaux sur les gaz, après ceux de Torricelli (1608-1647), de Pascal (1623-1662), de O. von Guericke (1602-1686) et d'autres, il est un des premiers à avoir senti le besoin d'une classification des corps et d'une recherche de critères de pureté ; il effectue pour cela des mesures de densité, des test à la flamme, il introduit l'usage des indicateurs colorés. Expérimentateur habile et infatigable doué d'une grande curiosité, Boyle est certainement le précurseur de Lavoisier et des grands chimistes du XVIII^e siècle.

Son contemporain O. Borrichius (1626-1690) montre, par une expérience très simple de pesée, que la congélation de l'eau ne lui ajoute aucune "particule de frigorique" ; l'eau liquide a le même poids que la glace dont elle provient.

Si les très célèbres Principes Mathématiques de Philosophie Naturelle d'Isaac Newton (1642-1727) ont dominé la pensée scientifique de son siècle et des deux siècles suivants, c'est dans son non moins célèbre Traité d'Optique que l'on trouve formulées ses conceptions sur la constitution de la matière. Atomiste, Newton l'est certainement, mais à sa manière. Partisan des idées de Démocrite, il n'est pas moins platonisant que ses collègues de Cambridge ; le tout amalgamé avec beaucoup de notions d'alchimie, que Newton a abondamment cultivée, comme tous les savants de son époque. Mais de ses nombreux travaux de chimie, il n'a rien publié, excepté un article de deux pages sur les acides et l'affinité acides-bases, la plupart de ses notes de chimie ayant été détruites pendant l'incendie de son laboratoire.

C'est donc dans l'Optique de 1706, annexée d'un certain nombre de questions (dans le style des Problèmes d'Aristote) que nous puiserons. La première chose qui frappe le lecteur de ces questions c'est le langage quasi-alchimique, mais ce n'est pas ce qui nous intéresse le plus ici.

La question 28 traite de l'éther, "ce milieu qui a été rejeté par les plus anciens et les plus célèbres philosophes de la Grèce et de la Phénicie, qui établirent pour premiers principes de leur philosophie le Vide, les Atomes et la Pesanteur de ces Atomes". Ce milieu, introduit, on se souvient, par Aristote, et dont Newton calcule l'élasticité ($40 \cdot 10^{10}$ fois celle de l'air !)* est peut-être aussi de nature corpusculaire, mais il ne sait pas "what this Aether is".** Il est probablement de la même constitution que l'air, mais beaucoup plus raréfié, plus subtil et plus élastique ; ce n'est pas une matière uniforme, puisqu'il est composé principalement "du corps phlegmatique de l'éther et d'autres esprits éthérés".

Il n'est pas nécessaire d'épiloguer ici sur ce milieu qui a été abondamment traité et à plusieurs reprises dans la littérature, sauf peut-être, pour donner la parole à Newton, qui s'explique sur ce sujet dans une lettre à Boyle, et qui pourrait avoir son intérêt :

I have so long deferred to send you my thoughts about the physical qualities we spole of, that did I not esteem myself obliged by promise, I think I sould be ashamed to send them at all. The truth is, my notions about things of this kind are so indigested, that I am not well satisfied myself in them ; and what I am not satisfied in, I can scarce esteem fit to be communicated to others ; especially in natural philosophy, where there is no end of fancying. But because I am indebted to you, and yesterday met with a friend, Mr. Maullyvever, who told me he was going to London, and intended to give you the trouble of a visit, I could not forbear to take the opportunity of conveying this to you by him.

It being only an explication of qualities which you desire of me, I shall set down my apprehensions in the form of suppositions as follows. And first, I suppose, that there is diffused through all places an aethereal substance, capable of contraction and dilatation, strongly elastic, and, in a word, much like air in all respects, but far more subtile.

2/I suppose this aether pervades all gross bodies, but yet so as to stand rarer in their pores than in free spaces, and so much the rarer, as their pores are less ; and this I suppose (with others) to be the cause why light incident on those bodies is refracted towards the perpendicular ; why two well-polished metals cohere in a receiver exhausted of air ; why mercury stands sometimes up to the top of a glass pipe, though much higher than thirty inches ; and one of the main causes why the parts of all bodies cohere ; also the cause of filtration, and of the rising of water in small glass pipes above the surface of the stagnating water they are dipped into ; for I suspect the aether may stand rarer, not only in the insensible pores of bodies, but even in the very sensible cavities of those pipes ; and the same principle may cause menstruums (solvents) to pervade with violence the pores of the bodies they dissolve, the surrounding aether, as well as the atmosphere, pressing them together.

3/I suppose the rarer aether within bodies, and the denser without them, not to be terminated in a mathematical superficies, but to grow

gradually into one another ; the external aether beginning to grow rarer, and the internal to grow denser, at some little distance from the superficies of the body, and running through all intermediate degrees of density in the intermediate spaces ; and this may be the cause why light, in Grimaldo's experiment, passing by the edge of a knife, or other opaque body, is turned aside, and as it were refracted, and by the refraction makes several colours...

4/When two bodies moving towards one another come near together, I suppose the aether between them to grow rarer than before, and the spaces of its graduated rarity to extend further from the superficies of the bodies towards one another ; and this, by reason that the aether cannot move and play up and down so freely in the strait (narrow) passage between the bodies, as it could before they came so near together... And as the other body approaches more and more, I suppose the aether between them will grow rarer and rarer. These suppositions I have so described, as if I thought the spaces of graduated aether had precise limits... But really I do not think they have such precise limits, but rather decay insensibly, and, in so decaying, extend to a much greater distance than can easily be believed or need be supposed.

5/Now, from the fourth supposition it follows, that when two bodies approaching one another come so near together as to make the aether between them begin to rarefy, they will begin to have a reluctance from being brought nearer together, and an endeavour to recede from one another ; which reluctance and endeavour will increase as they come nearer together, because thereby they cause the interjacent aether to rarefy more and more. But at length, when they come so near together that the excess of pressure of the external aether which surrounds the bodies, above that of the rarefied aether, which is between them, is so great as to overcome the reluctance which the bodies have from being brought together ; then will that excess of pressure drive them with violence together, and make them adhere strongly to one another, as was said in the second supposition... Now hence I conceive it is chiefly that a fly walks on water without wetting her feet, and consequently without touching the water ; that two polished pieces of glass are not without pressure brought to contact, no, not though the one be plain, the other a little convex, that the particles of dust cannot by pressing be made to cohere, as

they would do, if they did but fully touch ; that the particles of tingeing substances and salts dissolved in water do not of their own accord congregate and fall to the bottom, but diffuse themselves all over the liquor, and expand still more if you add more liquor to them. Also, that the particles of vapours, exhalations, and air do stand at a distance from one another, and endeavour to recede as far from one another as the pressure of the incumbent atmosphere will let them ; for I conceive the confused mass of vapours, air, and exhalations which we call the atmosphere, to be nothing else but the particles of all sorts of bodies, of which the earth consists, separated from one another, and kept at a distance by the said principle.

From these principles the actions of menstrums upon bodies may be thus explained : suppose any tingeing body, as cochineal or logwood be put into water ; so soon as the water sinks into its pores and wets on all sides any particle which adheres to the body only by the principle in the second supposition, it takes off, or at least much diminishes, the efficacy of that principle to hold the particle to the body, because it makes the aether on all sides the particle to be of a more uniform density than before. And then the particle being shaken off by any little motion, floats in the water, and with many such others makes a tincture ; which tincture will be of some lively colour, if the particles be all of the same size and density ; otherwise of a dirty one. For the colours of all natural bodies whatever seem to depend on nothing but the various sizes and densities of their particles, as I think you have seen described by me more at large in another paper...

Nor does the size only, but the density of the particles also, conduce to the permanency of aërial substances ; for the excess of density of the aether without such particles above that of the aether within them is still greater ; which has made me sometimes think that the true permanent air may be of a metallic origin ; the particles of no substances being more dense than those of metals. This, I think, is also favoured by experience, for I remember I once read in the Philosophical Transactions, how M. Huygens at Paris, found that the air made by dissolving salt of tartar would in two or three days time condense and fall down again, but the air made by dissolving a metal continued

without condensing or relenting in the least. If you consider then, how by the continual fermentations made in the bowels of the earth there are aërial substances raised out of all kinds of bodies, all which together make the atmosphere, and that of all these the metallic are the most permanent, you will not perhaps think it absurd, that the most permanent part of the atmosphere, which is the true air, should be constituted of these, especially since they are the heaviest of all other, and so must subside to the lower parts of the atmosphere and float upon the surface of the earth, and buoy up the lighter exhalations and vapours to float in greatest plenty above them. Thus, I say, it ought to be with the metallic exhalations raised in the bowels of the earth by the action of acid menstruums, and thus it is with the true permanent air ; for this, as in reason it ought to be esteemed the most ponderous part of the atmosphere, because the lowest, so it betrays its ponderosity by making vapours ascend readily in it, by sustaining mists and clouds of snow, and by buoying up gross and ponderous smoke. The air also is the most gross unactive part of the atmosphere, affording living things no nourishment, if deprived of the more tender exhalations and spirits that float in it; and what more unactive and remote from nourishment than metallic bodies ?

I shall set down one conjecture more, which came into my mind now as I was writing this letter ; it is about the cause of gravity. For this end I will suppose aether to consist of parts differing from one another in subtility by indefinite degrees ; that in the pores of bodies there is less of the grosser aether, in proportion to the finer, than in open spaces ; and consequently, that in the great body of the earth there is much less of the grosser aether, in proportion to the finer, than in the regions of the air ; and that yet the grosser aether in the air affects the upper regions of the earth, and the finer aether in the earth the lower regions of the air, in such a manner, that from the top of the air to the surface of the earth, and again from the surface of the earth to the centre thereof, the aether is insensibly finer and finer. Imagine now any body suspended in the air, or lying on the earth, and the aether being by the hypothesis grosser in the pores, which are in the upper parts of the body, than in those which are in its lower parts, and that grosser aether being less apt to be lodged in those pores than the finer aether below, it will endeavour to get out and give way to the finer aether below, which cannot be, without the bodies descending to make room above for it to go out into.

From this supposed gradual subtilty of the parts of aether some things above might be further illustrated and made more intelligible ; but by what has been said, you will easily discern whether in these conjectures there be any degree of probability, which is all I aim at. For my own part, I have so little fancy to things of this nature, that had not your encouragement moved me to it, I should never, I think, have thus far set pen to paper about them. What is amiss, therefore, I hope you will the more easily pardon in your most humble servant and honourer.

Cambridge, Feb.28, 1678/9. (15)

Isaac Newton

La question 30 de l'Optique traite de la nature corpusculaire de la lumière dont les rayons sont considérés comme des fort petits corpuscules élançés ou poussés hors des corps lumineux. Les plus petits de ces corpuscules produisent la lumière violette, les plus grosses des couleurs plus fortes et plus éclatantes, le Bleu, le Vert, le Jaune et le Rouge. Ne peut-il pas se faire une transformation réciproque entre les corps grossiers et la lumière ?... Cependant l'Eau se change en une Terre Fixe par des fréquentes distillations, comme M. Boyle l'a éprouvé... Le changement des corps en lumière et de la lumière en corps, est une chose très conforme au cours de la nature qui semble se plaie aux transformations. Or parmi toutes ces transformations si diverses et si étranges, pourquoi la nature ne changerait-elle pas aussi les corps en lumière et la lumière en corps ?.*

Contrairement à Platon, pour Newton " par la chaleur la Terre est changée en Feu; et par le moyen du froid elle redevient Terre".

Pour en venir à la matière, poursuivons la lecture de la question: "Pour expliquer la cause de cette cohésion, quelques-uns ont inventé des "Atomes crochus; mais c'est poser ce qui est en question : d'autres nous disent que les particules des Corps sont collées ensemble par le Repos, c'est-à-dire, par une Qualité occulte, ou poutôt par un pur Neant ; & d'autres qu'elles sont jointes ensemble par des mouvements *conspirants*, c'est-à-dire, par un Repos relatif entr'eux. Pour moi, j'aime mieux conclure de la cohésion des Corps, que leurs particules

s'attirent mutuellement par une Force qui dans le contact immédiat est extrêmement puissante; qui; à de petites distances, produit les Opérations chimiques mentionnées ci-dessus, & qui ne s'étend pas fort loin de ces particules par aucun effet sensible.

Tous les corps semblent être composés de particules dures :
car autrement les Fluides ne se congeleroient pas, comme l'Eau, les Huiles, le Vinaigre, l'Esprit ou l'Huile de Vitriol, qui sont congelés par le Froid; le Mercure, qui est congelé par les fumées du Plomb; l'Esprit de Nitre & le Mercure, par la dissolution du Mercure, & l'évaporation du phlegme; l'Esprit de vin & l'Esprit d'urine, lorsqu'ils font dephlegmés & mêlés ensemble ; & l'Esprit d'urine & l'Esprit de Sel, lorsqu'ils sont sublimés ensemble pour faire le Sel Armoniac. Il semble même que les Rayons de Lumière soient des Corps durs : car autrement ils ne conserveroient pas différentes propriétés dans leurs différents côtés. On peut donc considérer la Dureté comme une propriété de toute matière simple : c'est du moins ce qui semble aussi évident que l'Impenetrabilité universelle de la Matière; car tous les Corps, autant que nous les connoissons par expérience, sont durs, ou peuvent être endurcis, & nous n'avons point d'autre évidence d'une impenetrabilité universelle qu'une vaste expérience qui n'est contredite par aucune exception expérimentale. Or si les Corps composés sont aussi durs que l'Expérience nous le fait voir à l'égard de quelques-uns, & que cependant ils ayent beaucoup de pores, & soient composés de parties qui sont seulement placées l'une auprès de l'autre; les particules simples qui sont sans pores, & qui n'ont jamais été divisées, doivent être beaucoup plus dures : car ces sortes de particules dures, entassées ensemble, ne peuvent guere se toucher que par très peu de points: & par conséquent il faut beaucoup moins de force pour les séparer que pour rompre une particule solide dont les parties se touchent dans tout l'Espace qui est entr'elles, sans qu'il ait ni pores ni interstices qui affaiblissent leur cohésion. Or comment des particules d'une si grande dureté, qui sont seulement entassées ensemble, sans se toucher qu'en très petit nombre de points"....

Plus intéressante encore pour le problème qui nous occupe, est la question 31 que nous ne reproduirons pas, à cause de sa longueur.

Newton y considère qu'à part la gravité, le magnétisme et l'électricité, "il peut y avoir d'autres attractions qui s'étendent à des si petites distances, qu'elles ont échappé jusqu'ici à l'observation" (italiques ajoutées).

Venons à la conclusion :

" Toutes ces choses dûment considérées, il me semble très probable qu'au commencement Dieu forma la Matière en particules solides, massives, dures, impénétrables, de telles grandeurs & figures, avec telles autres propriétés, en tel nombre, en telle quantité, & en telle proportion à l'Espace, qui convenoient le mieux à la fin pour laquelle il les formoit; & que par cela même que ces Particules primitives sont solides, elles sont incomparablement plus dures qu'aucun des Corps poreux qui en sont composés; & si dures qu'elles ne s'usent ni ne se rompent jamais, rien n'étant capable, selon le cours ordinaire de la Nature, de diviser en plusieurs parties ce qui a été fait originairement un, par la disposition de Dieu lui-même. Tandis que ces Particules continuent dans leur entier, elles peuvent constituer dans tous les siècles des Corps d'une même nature & contexture : mais si elles venoient à s'user ou à être mises en pièces, la nature des choses qui dépend de ces Particules, telles qu'elles ont été faites d'abord, changeroit infailliblement. L'Eau & la Terre, composées de vieilles Particules usées, & de fragments de ces particules, ne seroient pas à présent de la même nature, & contexture que l'Eau & la Terre qui auroient été composées au commencement de particules entières. Par conséquent, afin que la Nature puisse être durable, l'alteration des Etres Corporels ne doit consister qu'en différentes séparations, nouveaux assemblages & mouvements de ces Particules permanentes; les Corps composés étant sujets à se rompre, non par le milieu

de ces Particules solides, mais dans les endroits où ces Particules sont jointes ensemble, et ne se touchent que par un petit nombre de points.

Il me semble d'ailleurs que ces Particules ont non seulement *une force d'inertie*, accompagnée des Loix passives du mouvement, qui résultent naturellement d'une telle *force*; mais qu'elles sont aussi muës par certains Principes actifs, tel qu'est celui de la Gravité, & celui qui produit la fermentation & la cohésion des Corps. Je ne considère pas ces Principes comme des Qualités occultes, qui soient supposées résulter de la forme spécifique des Choses ; mais comme des Loix générales de la Nature, par lesquelles les Choses même sont formés".

Et Newton termine dans le plus pur des styles platoniciens :

Dieu est un Etre uniforme, sans organes, sans membres ou parties ;
Dieu n'a pas besoin de pareils organes parce qu'il est présent partout aux Choses mêmes. Comme l'Espace est divisible à l'infini, et que la Matière n'est pas nécessairement dans toutes les parties de l'Espace, il faut convenir aussi que Dieu peut créer des particules de matière de différentes grosseurs et figures, en différents nombres et en différentes quantités par rapport à l'espace qu'elles occupent, et peut-être même de différentes densités et de différentes forces ; et diversifier par là les Loix de la Nature, et faire des Mondes de différentes espèces en différentes parties de l'Univers. Je ne vois du moins aucune contradiction en tout cela ⁽¹⁶⁾.

Newton estime encore les dimensions de ses particules par des mesures optiques ; elles sont de l'ordre du millième de l'inch, mais là il se trompe grandement.

Pour son contemporain et ennemi G.W. Leibnitz (1646-1716), les fameux quatre corps ne s'accordent pas bien avec sa théorie des monades :

Je crois cependant que les quatre corps qu'ils (nos philosophes) appellent éléments, qu'ils croient simples, et les sels et les métaux, et les autres corps, qu'ils croient être mêlés parfaitement, et à qui ils accordent leurs tempéraments, ils ne sont pas unum per se non plus, d'autant plus qu'on doit juger qu'ils ne sont uniformes et similaires qu'en apparence, et même un corps similaire ne laisserait pas d'être un amas. En un mot l'unité parfaite doit être réservée aux corps animés ou doués d'entéléchies primitives ; car ces entéléchies ont des analogies avec les âmes et sont aussi indivisibles et impérissables qu'elles : et j'ai fait juger ailleurs que leurs corps organiques sont des machines en effet, mais qui surpassent autant les artificielles, qui sont de notre invention, que l'inventeur des naturelles nous surpasse... Mais il n'appartenait qu'à notre temps de développer ce mystère et d'en faire comprendre l'importance et les suites pour bien établir la théologie naturelle et ce qu'on appelle la pneumatique, d'une manière qui soit vraiment naturelle et conforme à ce que nous pouvons expérimenter et entendre, qui ne nous fasse rien perdre des importantes considérations qu'elles doivent fournir, ou plutôt qui les rehausse, comme fait le mystère de l'harmonie préétablie (italiques ajoutées) ⁽¹⁷⁾.

Il n'avait donc pas totalement tort le philosophe cartésien de Lyon, S. Régis (1632-1701) en disant qu'on ne voit dans les Traités de Physique qu'expériences entassées les unes sur les autres, avec des explications qu'on ne peut réduire aux mêmes principes, parce qu'elles sont fondées sur des analogies qui n'ont aucune analogie entre-elles.

B. de Fontenelle (1657-1757) dira aussi un peu plus tard qu'il n'y a pas si longtemps que tous les raisonnements de Chimie n'étaient que des espèces de fictions poétiques, vives, animées, agréables à l'imagination, inintelligibles et insupportables à la raison ⁽¹⁸⁾.

VI - LE SIECLE DES LUMIERES (XVIIIème)

La physique du XVIIIème siècle est dominée par les théories newtoniennes et enregistre des progrès considérables, mais la chimie cherche encore sa voie. Dès le début de ce siècle apparaît, pour la première fois dans l'histoire de la chimie, une théorie capable d'expliquer un grand nombre de phénomènes, la théorie du Phlogistique (1702) formulée par le célèbre chimiste allemand G.E. Stahl (1660-1734). En violente opposition avec les iatrochimistes dont la science "n'est qu'un leurre lancé jusqu'à ces jours aux imaginations faciles et crédules", Stahl ne pense pas que l'air entre comme ingrédient dans la composition des mixtes qui sont des corps formés par l'union de deux ou trois espèces différentes de parties homogènes jusqu'à leurs derniers atomes. Comme son maître Becher, Stahl raisonne en termes de principes premiers, principes principiés, etc, mais sa théorie du phlogistique a eu un grand retentissement.

Ce principe de l'inflammabilité qui dérive de la terre sulfureuse de Becher, possède des nombreuses et étranges propriétés : combiné à une substance non-inflammable, il la transforme en un nouveau composé qui n'est ni chaud ni lumineux, suivant la quantité de phlogistique qu'elle a absorbé ; le phlogistique diminue la dureté et augmente la fusibilité des corps avec lesquels il se combine, mais ne les rend pas plus fluides pour autant ; il augmente le poids des corps tout en leur communiquant de l'opacité ; il est responsable des couleurs et des odeurs, mais même les corps incolores ou

inodores contiennent du phlogistique. Le charbon, les matières animales et végétales sont des combinaisons de la partie terreuse des corps organisés avec le phlogistique contenu dans leurs huiles et leurs graisses. Par action des acides les métaux libèrent leur phlogistique, sans qu'il y ait combustion ; par contre les métaux calcinés, réduits en chaux, peuvent se recombinaisonner avec le phlogistique et reprendre la forme métallique par fusion avec les matières charbonneuses.

Voici l'expression de Stahl (Traité de Soufre):

Je crois être fondé à dire que : premièrement, relativement au feu, ce principe sulfureux, est non seulement un être approprié au mouvement igné et même celui qui y semble uniquement destiné, mais encore à parler raisonnablement, ce principe est le feu corporel, la vraie matière du feu... cependant, hors de la mixtion, il ne donne point de feu, il se dissipe et se volatilise en particules indivisibles, ou du moins il produit simplement de la chaleur qui est un feu très divisé. D'un autre côté il est important d'observer que cette matière ignée par elle même et sans le concours de l'air et de l'eau, ne se trouve ni atténuée ni volatile, mais lorsqu'elle a été une fois atténuée ou volatilisée par le mouvement du feu et par le contact de l'air libre, alors elle est d'une subtilité et d'une dilatation qui la rendent méconnaissable à tous les sens, au point qu'il n'y a plus moyen de la reconnaître, de la rapprocher ou de la rassembler, surtout si cela devait se faire promptement et en grande quantité... D'après toutes ces circonstances réunies, j'ai jugé que l'on ne pourrait donner à cette matière de nom plus convenable que celui de la matière ou de principe inflammable : en effet comme jusqu'ici on ne l'a pu trouver ni reconnaître nulle part sans qu'elle fût combinée et que, par conséquent, on ne peut lui donner de définition, ni lui donner une dénomination d'après quelque propriété qui lui convienne uniquement, il me semble que rien n'est plus raisonnable que de la nommer d'après les effets généraux qu'elle produit dans ses dernières mixtions, voilà pourquoi je lui donne le nom grec de phlogiston, phlogistique ou inflammable (brennbar) ⁽¹⁹⁾.

Aussi aberrante qu'elle puisse nous paraître aujourd'hui, cette théorie expliquait, en son temps, un grand nombre de faits expérimentaux et avait le grand avantage d'unifier dans une doctrine commune les phénomènes de calcination des métaux d'une part et de combustion des organiques de l'autre ; elle fut donc presque universellement adoptée pendant tout un siècle, au point que quand Cavendish (1731-1810) prépara l'hydrogène (air inflammable, 1765), il a pensé avoir isolé le phlogistique ; de même Priestley en découvrant l'oxygène (1774) décrit l'air déphlogistiqué. De son côté Stahl s'est employé à isoler le phlogistique en enflammant par une bougie dans le creux d'une cuiller de l'huile de térébenthine et recueillant sur le dos d'une autre cuiller froide la suie qui s'élevait. "Par là", conclut-il, "je démontrerais la possibilité de mon problème et je fis voir que la vérité est toujours simple". Ainsi notre noir de fumée n'était que du phlogistique pur.

Baumé (1728-1804) et Macquer (1718-1794) inventeront par la suite un phlogistique sans poids ou à poids négatif pour expliquer les phénomènes de calcination des métaux. La difficulté n'était d'ailleurs pas trop grande, puisqu'il y avait des métaux parfaits qui perdaient très difficilement leur phlogistique, et des métaux imparfaits doués de la propriété contraire ; un métal était considéré comme une combinaison de ce que nous appelons ainsi avec le phlogistique.

On pensait de même pendant tout le XVIIIème siècle qu'il y avait deux sortes de substances : celles qui possèdent un poids et sont réellement "matérielles" et celles qui n'en possèdent pas, comme la lumière, le calorique, le magnétisme et l'électricité, qui sont des "impondérables", des "effluves subtiles".

Un changement interviendra avec l'étude des gaz, commencé déjà au siècle précédent. Il s'agit bien évidemment de l'air et des gaz qui se dégagent naturellement ou pendant les fermentations. St. Hales (1677-1761) constate qu les différents "airs" qu'il collecte, tout en obéissant à la loi de Boyle-Mariotte, ne sont pas identiques (1754) il y a en particulier une espèce élastique et fixe. Le chimiste écossais J. Black (1728-1799) reconnaît par la suite que l'air fixe de Hales est très différent de l'air atmosphérique. La calcination de la Magnesia alba (carbonate de magnésium) perd une

quantité de cet air fixe égale à 7/12 de son poids, et ce gaz est plus dense que l'air et ne favorise pas la combustion. Black démontre par des expériences quantitatives que la magnésie calcinée et les autres hydroxides nécessitent, pour être neutralisés, la même quantité d'acide que leurs carbonates ; il effectue des mesures calorimétriques et utilise l'attraction newtonienne pour formuler l'affinité chimique, dont Geoffroy l'Ainé (1672-1731) avait publié une table (1718) à laquelle bien d'autres ont succédé par la suite.

Activement poursuivie pendant la seconde moitié du XVIII^e siècle, l'étude des gaz aboutit à des résultats surprenants avec J. Priestley (1733-1804), C.W. Scheele (1742-1886), H. Cavendish (1731-1810), A.L. Lavoisier (1743-1794) et Cl. L. Berthollet (1748-1822).

Par action des acides sur les métaux, Cavendish prépare l'hydrogène (1765) auquel il donne le nom "d'air inflammable" ; il pense alors avoir isolé le phlogistiqué et en étudiant la production de l'air déphlogistiqué (oxygène), il découvre (1774) que l'eau n'est pas un élément, mais une substance composée :

By the experiments with the globe it appeared, that when inflammable and common air are exploded in a proper proportion, almost all the inflammable air and nearly one fifth of the common air, lose their elasticity, and are condensed into dew. And by this experiment it appears that this dew is plain water.

Lavoisier, en étudiant avec Boucquet la combustion de l'hydrogène (1783), s'attend à obtenir un acide, mais il trouve, avec Laplace, que c'est bien de l'eau qu'il se forme.

Phlogisticien convaincu, Priestley expérimente aussi avec l'air et les gaz en général ; il identifie le monoxyde et le bioxyde de carbone, mais ce qui nous intéresse le plus ici est son mémoire Of Dephlogisticated Air, and the Constitution of the Atmosphere (1774) où il dit :

There are, I believe, very few maxims in philosophy that have laid firmer hold upon the mind, than that air, meaning atmospherical air is

a simple elementary substance, indestructible and unalterable, at least as much so as water is supposed to be. In the course of my inquiries, I was, however, soon satisfied that atmospherical air is not an unalterable thing... It will be seen in my last publication, that, from the experiments which I made on the marine acid air, I was led to conclude that common air consisted of some acid and phlogiston ; because the union of this acid vapor and phlogiston made inflammable air, and becomes respirable... ever since my discovery that atmospheric air is alterable, and therefore that it is not an elementary substance, but a composition... But what surprised me more than can well express, was that a candle burned in this air with a remarkably vigorous flame... I frequently mentioned my surprise at that kind of air which I have got from this preparation to Mr Lavoisier, Mr Le Roy, and several other philosophers, who honoured me with their notice in that city (Paris) ; and who, I dare say, cannot fail to recollect the circumstance.

Effectivement Lavoisier a écrit par la suite : "cette espèce d'air a été découverte presque en même temps par le docteur Priestley, M. Scheele et moi-même.

Priestley avait aussi découvert l'azote (1772) ou air phlogistiqué par suite d'une série d'expériences which prove that ordinary air, consisting of two kinds of elastic fluids, can be compounded again after these have been separated from each other by means of phlogiston. Lavoisier a en effet montré que 73 parties de ce fluide élastique mélangées à 27 parties d'air "éminemment respirable", donnent un fluide élastique "parfaitement similaire à l'air atmosphérique en toutes ses propriétés" ; il l'appela mofette résiduaire, puis azote.

De même, quand Scheele découvrit le chlore (1774), il lui donna le nom d'acide marin (ou myriatique déphlogistiqué), mais ce n'est qu'en 1809 que Davy a reconnu qu'il s'agissait d'un élément.

Ainsi au moins deux des corps platoniciens, l'eau et l'air, sont définitivement reconnus comme étant des corps composés ; il sera bientôt de même de la terre et seul le feu, sous la dénomination de calorique, semble vouloir résister. Il faut cependant noter que les notions de corps composé et de corps simple ou élément ne sont pas encore bien dégagées à la fin du

siècle. En effet si ces notions nous paraissent si simples actuellement, il n'en était pas de même pour les chimistes de l'époque qui opéraient le plus souvent sur des substances naturelles complexes et ne possédaient pas encore des critères précis de pureté et d'identification.

D'Alembert, par exemple, termine ainsi son court article ELEMENT dans l'Encyclopédie : on sera peut-être étonné de la brièveté de cet article ; mais nos connaissances sur ce qui en fait l'objet sont encore plus courtes.

Dans sa Chimie Expérimentale et Raisonnée (1777), Baumé pense encore que l'eau et l'air "sont deux éléments qui ont la propriété de dissoudre beaucoup de substances". Toute autre est l'opinion de Lavoisier dans le Discours Préliminaire de son célèbre Traité Élémentaire de Chimie (1789) :

Tout ce qu'on peut dire sur le nombre et sur la nature des éléments se borne, suivant moi, à des discussions purement métaphysiques ; ce sont des problèmes indéterminés qu'on se propose de résoudre, qui sont susceptibles d'une infinité de solutions, mais dont il est probable qu'aucune en particulier n'est d'accord avec la nature. Je me contenterai donc de dire que si par le nom d'éléments nous entendons désigner les molécules qui composent les corps, il est probable que nous ne les connaissons pas : que si au contraire nous attachons au nom d'éléments ou de principes des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse, toutes les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen sont pour nous des éléments ; non pas que nous puissions assurer que ces corps que nous regardons comme simples, ne soient pas eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes, mais puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière de corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve.

Le tableau des corps simples de Lavoisier comprend 23 éléments, avec la lumière et le calorique en tête et dans ses "Observations sur les Combinaisons de la Lumière et du Calorique avec les différentes substances", il note :

TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES

NOMS NOUVEAUX	NOMS ANCIENS CORRESPONDANTS
Lumière	Lumière
Calorique	Chaleur,Fluide igné,Feu
Oxygène	Air déphlogistiqué,Air vital
Azote	Gaz phlogistiqué,Mofette
Hydrogène	Gaz inflammable
Soufre	Soufre
Phosphore	Phosphore
Carbone	Carbon pur
Radical myriatique	Inconnu
Radical fluorique	Inconnu
Radical boracique	Inconnu
Antimoine	Antimoine
Argent	Argent
Arsenic	Arsenic
Bismuth	Bismuth
Cobalt	Cobalt
Cuivre	Cuivre
Etain	Etain
Fer	Fer
Manganèse	Manganèse
Mercure	Mercure
Molybdène	Molybdène
Nickel	Nickel
Or	Or
Platine	Platine
Plomb	Plomb
Tungstène	Tungstène
Zinc	Zinc
Chaux	Terre calcaire,Chaux
Magnésie	Base de sel d'Epsom,Magnésie
Baryte	Barote,Terre pesante
Alumine	Argile,Terre d'alun
Silice	Terre siliceuse,Terre vitrifiable

Fig. 1 D'après Lavoisier:Traité Élémentaire de Chimie
(Paris,1789)

Je n'ai point formé de tableau pour les combinaisons de la lumière et du calorique avec les substances simples ou composées, parce que nous n'avons point encore des idées suffisamment arrêtées sur ces sortes de combinaisons. Nous savons, en général, que tous les corps de la nature sont plongés dans le calorique, qu'ils en sont environnés, pénétrés de toutes parts, et qu'il remplit tous les intervalles que laissent entre elles leurs molécules : que, dans certains cas, le calorique se fixe dans les corps, de manière même à constituer leurs parties solides ; mais que le plus souvent il en écarte les molécules, il exerce sur elles une force répulsive, et que c'est de son action ou de son accumulation plus ou moins grande que dépend le passage des corps de l'état solide à l'état liquide, de l'état liquide à l'état aériforme. Enfin, nous avons appelé d'un nom générique de gaz toutes les substances portées à l'état aériforme par une addition suffisante de calorique ; en sorte que, si nous voulons désigner l'acide muriatique, l'acide carbonique, l'hydrogène, l'eau, l'alcool dans l'état aériforme, nous leur donnons le nom de gaz acide muriatique, gaz acide carbonique, gaz hydrogène, gaz aqueux, gaz alcool.

A l'égard de la lumière, ses combinaisons et sa manière d'agir sur les corps sont encore moins connues. Il paraît seulement, d'après les expériences de M. Berthollet, qu'elle a une grande affinité avec l'oxygène, qu'elle est susceptible de se combiner avec lui, et qu'elle contribue avec le calorique à le constituer dans l'état de gaz ⁽²⁰⁾.

Quant aux terres figurant à la fin du tableau il est à présumer qu'elles cesseront bientôt d'être comptées au nombre des substances simples... J'espère que le lecteur voudra bien ne pas confondre ce que je donne pour des vérités de fait et d'expérience avec ce qui n'est encore qu'hypothétique.

On remarquera encore dans le tableau de Lavoisier l'absence du phlogistique, habituellement en tête de tels tableaux, mais dès le début de ses travaux il semble l'ignorer complètement pendant dix ans ; en 1783 il publie enfin ses "Réflexionx sur le Phlogistique" :

-Le phlogistique est un véritable Protée qui change de forme à chaque instant.

-Le phlogistique n'existe pas.

-L'air du feu, l'air déphlogistiqué est un corps simple.

A sa suite Cl. L. Berthollet (1748-1822), auparavant phlogisticien, déclarera "inutile" l'hypothèse du phlogistique.

Le problème de la transformation de l'eau en terre et réciproquement, occupe beaucoup Lavoisier. Pendant 101 jours, il distille de l'eau en circuit fermé (1770), et après avoir soigneusement tout pesé, il ne constate aucune variation de poids : le récipient a perdu 17 grains de son poids, l'eau a augmenté un peu de densité et il y a un résidu de 20 grains ! Passant outre à la différence de $20 - 17 = 3$ grains, Lavoisier conclut que tout ce que le verre a perdu est passé à l'eau. L'eau nese change pas en terre.

Par la suite Lavoisier s'attaque à la variation du poids des corps par calcination (soufre, phosphore, puis étain et mercure). Ses expériences ne sont pas différentes dans leur principe de celles de van Helmont et de Boyle, mais la conclusion est toute autre : si les corps augmentent de poids en brûlant, c'est par suite de la fixation d'une partie de l'air enfermé dans le récipient. "Cette découverte", dit J. B. Dumas (1800-1884), "me paraît une des plus intéressantes qu'on ait faites depuis Stahl".⁽¹³⁾

Vient ensuite l'étude des phénomènes de la respiration, l'analyse de l'air et de l'eau, où tout passe soigneusement par la balance. Lavoisier n'a pas énoncé la loi de la conservation de la masse au cours des transformations chimiques, qui porte son nom et sous-tend toute son oeuvre ; il dit plus simplement : Je puis considérer les matières mises en présence et le résultat obtenu, comme une équation algébrique ; et en supposant successivement chacun des éléments de cette équation inconnus, j'en puis tirer une valeur et rectifier ainsi l'expérience par le calcul et le calcul par l'expérience. Ainsi par exemple il trouve comme rapport des volumes de l'oxygène et de l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau 100/192 qu'il corrige en 1/2. Ces rectifications seront confirmées par la suite, et avec toute la précision désirable, par les analystes.

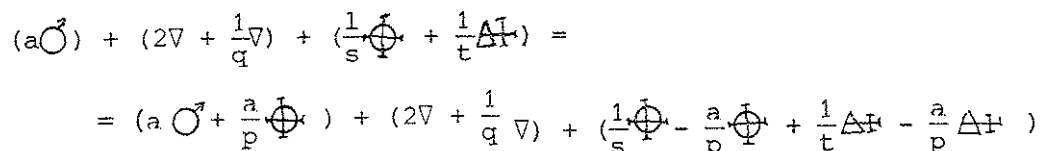
La lumière est-elle une modification du calorique, ou bien est-ce

le calorique qui est une modification de la lumière ? Pour Lavoisier, il est impossible de se prononcer "en l'état actuel de nos connaissances", mais, avec Laplace, il trouve le moyen de mesurer le calorique contenu dans un corps par la quantité de glace qu'il est capable de fondre. Ce corps de nature "éminemment élastique" n'a pas de poids. Cependant Lavoisier avait mis le calorique ou "matière de feu" au centre de son système ; l'oxygène, par exemple, n'était pas pour lui, à proprement parler, un élément, mais une combinaison du principe "oxygène" (principe des acides) avec du calorique ; pour isoler l'élément oxygène il faudrait le refroidir suffisamment, afin d'enlever tout le calorique. Cette thèse de Lavoisier est critiquée par Berthollet qui montre que plusieurs acides ne contiennent pas d'oxygène, mais H. Davy (1778-1829) soutient au contraire que l'oxygène est une combinaison de la lumière, à laquelle il donne le nom de "phosoxysgen" (1799), et que la chaleur est une sorte de mouvement, tandis qu'il juge "imaginaire" le calorique.

Une autre contribution de Lavoisier, et non la moindre, est la Nouvelle Nomenclature Chimique, élaborée avec la collaboration de Guyton de Morveau, Berthollet et Fourcroy, qui remplace le vocabulaire confus de l'ancienne chimie et ouvre la voie à une classification plus rationnelle des composés chimiques, dont le nombre augmente chaque jour.

Ainsi, à la fin de ce siècle, les anciennes théories des 4 éléments et des différents "principes" sont en voie de disparition ; seul le "feu" subsiste encore sous forme de calorique ou de lumière. La notion d'élément chimique n'est certes pas tout à fait dégagée, mais on connaît un certain nombre (23 pour Lavoisier) ; les grandes méthodes de l'analyse et de la synthèse de la nouvelle chimie se développent rapidement et l'introduction systématique de la balance contrôle toutes les opérations du laboratoire. La chimie commence à devenir une science quantitative et exacte.

Voici, à titre d'exemple, une équation chimique de Lavoisier (1782) représentant la dissolution de a parties de fer avec une partie d'acide nitrique (= $\frac{1}{q}$ parties d'eau + $\frac{1}{s}$ parties d'oxygène + $\frac{1}{t}$ parties d'oxyde d'azote) :



De son côté la physique newtonienne, pendant longtemps négligée en France, gagne le continent, grâce à Clairaut, d'Alembert et Voltaire, mais elle reste macroscopique, et la théorie cinétique des gaz, dont D. Bernoulli (1700-1782) avait jeté les bases dans son Hydrodynamica (1730) ne trouve pas de continuateurs pendant ce siècle. Par contre la mécanique connaît un développement explosif avec les grands noms de L. Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813), Laplace (1749-1827), W. Hamilton (1805-1865) et bien d'autres ; il en est de même de l'astronomie.

L'éther de Newton est universellement adopté pour rendre compte des phénomènes lumineux, même par Chr. Huygens (1629-1695) qui avait développé une élégante théorie ondulatoire de la lumière contraire à celle de Newton, qui ne sera reprise que pendant le siècle suivant par T. Young (1773-1829) et A. Fresnel (1788-1827). On sait que ce mystérieux éther survivra jusqu'au début du XX^e siècle (A. Einstein, 1905).

Une autre ancienne théorie toujours vivante, est la théorie de la force vitale, responsable de la capacité des organismes vivants de synthétiser par son concours les nombreux composés organiques qu'on en retire, mais que l'on ne sait pas encore préparer au laboratoire. Elle survivra encore pendant un demi-siècle.

VII - LE XIXÈME SIÈCLE ET L'ÉCLOSION DE

LA THÉORIE ATOMIQUE

L'acquisition de la connaissance, dont nous avons essayé d'indiquer le tortueux cheminement, ne peut certes pas être découpée, comme le temps, par tranches de siècles, mais ce découpage est assez bien justifié dans le cas présent par l'apparition soudaine de la théorie atomique. Si le travail du siècle précédent a beaucoup contribué au dégagement des notions de corps pur, composé et corps simple et à l'établissement d'un certain nombre de critères de pureté, les principaux travaux qui ont amené à la formulation de la théorie atomique appartiennent presque entièrement à ce siècle.

En effet J.L. Proust (1755-1826), à la suite d'une longue et patiente série d'analyses effectuées au laboratoire royal de Madrid, constate que la composition d'une substance chimique pure est toujours la même, quelque en soit la provenance.

Ce résultat simple et séduisant ne satisfait pourtant pas Berthollet qui soutient que les éléments peuvent se combiner en toutes proportions. Cependant, après une longue controverse, l'intuition de Proust finit par l'emporter et la loi des proportions définies est énoncée par Dalton (1803). Une distinction nette et définitive est établie entre mélanges et corps purs.

Mais J. Dalton (1766-1844) qui pendant 5 ans étudiait les gaz et la vapeur d'eau, fait un pas décisif plus loin. Après avoir découvert la loi des pressions partielles des mélanges gazeux, qui porte son nom, la diffusion

des gaz et la loi de Charles, que ce dernier venait de découvrir avant lui, il trouve, par suite d'analyses des composés de carbone et d'hydrogène, que les proportions de ces éléments dans leurs composés ne sont pas seulement définies, mais peuvent varier d'une manière discontinue tout en restant dans des rapports simples. Il reprend alors la notion d'atomes ou particules élémentaires pour conclure que "the ultimate particles of all homogeneous bodies are perfectly alike in weight, figure, etc", et dans son New System of Chemical Philosophy (1808) il se propose de déterminer le nombre et le poids de tous les principes chimiques élémentaires qui peuvent entrer en "toute sorte de combinaisons les uns avec les autres". En considérant les trois états physiques que l'eau peut prendre, Dalton est amené à concevoir que tout corps de grandeur sensible, qu'il soit solide ou liquide, est constitué d'un grand nombre de particules extrêmement petites, ou atomes de matière, unis ensemble par une force d'attraction, qui est plus ou moins puissante selon les circonstances, et comme elle tend à empêcher leur séparation, est appelée à ce point de vue attraction de cohésion... ou plus simplement affinité. A côté de ces forces, Dalton fait intervenir une force répulsive attribuée à la chaleur : une atmosphère de ce fluide subtil entoure constamment les atomes de tous les corps et les empêche de venir effectivement en contact, car le volume d'un corps diminue si on lui enlève de la chaleur.*.

Si deux corps A et B peuvent se combiner, l'ordre dans lequel leurs combinaisons peuvent avoir lieu est le suivant, en commençant par les plus simples :

1 atome de A + 1 atome de B = 1 atome de C, binaire
1 atome de A + 2 atomes de B = 1 atome de D, ternaire
2 atomes de A + 1 atome de B = 1 atome de E, ternaire
1 atome de A + 3 atomes de B = 1 atome de F, quaternaire
etc,etc⁽²¹⁾.

Une table illustre, en représentation plane, dont W. Higgins avait donné un exemple avec les trois oxydes de l'azote dès 1789, la disposition des atomes dans les différents types de composés ; elle comprend 20 corps simples et les poids relatifs de leurs atomes, avec celui de l'hydrogène pris comme unité, mais "il ne faut pas en déduire que toutes ces particules

désignées comme simples sont nécessairement telles théoriquement ; elles ont nécessairement ces poids uniquement".*

Ainsi dans notre notation actuelle (introduite par Berzelius (1823)) la formule de l'eau serait HO, celle de l'ammoniac HN, etc, mais pour le moment la question est secondaire. La conclusion principale est la loi des proportions multiples qui en découle, mais, comme Dalton le note, "the theory was almost universally misunderstood, and consequently reprobated".

La représentation des molécules à trois dimensions est proposée par W.W. Wollaston (1808).**

Entre temps les recherches importantes de J. Gay-Lussac (1778-1850) sur les propriétés physiques des gaz d'abord, puis, avec A. von Humboldt (1769-1859), sur leurs combinaisons, conduisent à la conclusion importante que ces substances se combinent entre elles en des proportions très simples, et que la contraction en volume qui résulte de leur combinaison suit aussi la même loi régulière... J'espère par ce moyen donner une démonstration de l'idée avancée par plusieurs chimistes très distingués, que nous ne sommes probablement pas très loin du temps où nous serons capable de soumettre l'ensemble des phénomènes chimiques au calcul.

Inspiré de ces travaux, Amedeo Avogadro (1776-1856), dans un important mémoire dans le Journal de Physique de la Métherie (1811), en donne une explication très simple par la célèbre hypothèse qui porte son nom : La première hypothèse qui se présente et apparemment la seule admissible, est de supposer que le nombre des molécules intégrantes dans tout gaz est toujours le même pour des volumes égaux, ou toujours proportionnel aux volumes.

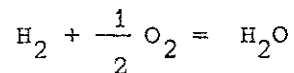
Avogadro trouve en plus dans son hypothèse le moyen de déterminer les masses relatives des molécules, puisque les rapports des masses des molécules sont alors les mêmes que ceux des densités des différents gaz aux mêmes conditions de température et de pression, et le nombre relatif des molécules dans un composé est immédiatement donné par le rapport des volumes des gaz qui le composent... Ainsi, puisque les nombres 1,10359 et

et 0.07321 expriment les densités de l'oxygène et de l'hydrogène, le rapport de ces deux nombres représente par conséquent le rapport entre les masses de volumes égaux de ces deux gaz, il représentera aussi, dans notre hypothèse, le rapport des masses de leurs molécules. Ainsi la masse de la molécule d'oxygène sera environ 15 fois celle de la molécule d'hydrogène, ou, plus exactement, comme 15,074 : 1 ... Comme d'autre part on sait que le rapport des volumes d'hydrogène et d'oxygène dans la formation de l'eau est 2 : 1, il en résulte que l'eau provient de l'union de chaque molécule d'oxygène avec deux molécules d'hydrogène. On ne saurait mieux s'expliquer, mais Avogadro va plus loin dans ses hypothèses : Les molécules constituantes de tout gaz simple ne sont pas formées d'une molécule élémentaire solitaire, mais d'un certain nombre d'entre elles unies par attraction pour en former une seule ; de plus quand des molécules d'une autre substance s'unissent avec la précédente pour former une molécule composée, la molécule intégrante qui devrait en résulter, se scinde en deux ou plusieurs parties composées de 1/2, 1/4, etc du nombre des molécules élémentaires qui vont former la molécule constituante de la première substance, combinées avec 1/2, 1/4, etc du nombre des molécules constituantes de la seconde substance qui doivent entrer en combinaison avec une molécule constituante de la première substance ; de sorte que le nombre des molécules intégrantes du composé devient double, quadruple, etc de ce qu'il serait s'il n'y avait pas de rupture, et exactement ce qui est nécessaire pour satisfaire au volume du gaz résultant.

En d'autres termes, l'équation de formation de l'eau ne doit pas s'écrire, comme Dalton le voulait :



mais



Encore mieux notre hypothèse, en supposant qu'elle est bien fondée, nous permet de confirmer ou rectifier ses résultats (à Dalton) à partir des données précises, et surtout d'assigner une grandeur aux molécules composées en accord avec le volume des composés gazeux, qui dépend en partie d'une division des molécules entièrement insoupçonnée des physiciens.

A.M. Ampère* (1775-1836) arrivait à la même conclusion en 1814 et Avogadro lui même est revenu à la charge à plusieurs reprises, mais leur hypothèse n'a séduit personne ; Dalton l'avait envisagée pour la rejeter et J.B. Dumas faisait des distinctions subtiles entre atomes physiques divisibles et atomes chimiques insécables pour conclure ainsi : Ma conviction, c'est que les équivalents des chimistes, ceux de Wentzel, de Mitscherlich, ce que nous appelons atomes, ne sont autre chose que des groupes moléculaires. Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience. Et il n'avait pas totalement tort !

L'hypothèse d'Avogadro-Ampère fut bel et bien oubliée pendant 40 ans et ce n'est que S. Cannizzaro (1826-1910), A. Laurent (1807-1853) et Ch. Gerhardt (1816-1856) qui ont reconnu son utilité et sa valeur pour la détermination des poids atomiques.* *

Une autre hypothèse aussi séduisante a été formulée en 1815 par le médecin anglais W. Prout (1785-1850). A cette époque on connaissait une trentaine d'éléments, dont les poids atomiques (à la précision du moment) semblaient être des nombres entiers (avec comme base H = 1,00), ce qui permit à Prout de supposer que l'atome d'hydrogène était le constituant universel de tous les atomes. Cette règle des nombres entiers, violemment combattue par Berzelius et bien d'autres, fut aussi vite oubliée, pour ressusciter au début du XXème siècle avec la découverte des isotopes ; elle s'est avérée inexacte après la découverte du phénomène de défaut de masse des noyaux.

Entre temps la découverte de l'électrophore par Volta^{***} (1745-1827) devient un puissant moyen d'analyse entre les mains de H. Davy qui découvre coup sur coup les métaux alcalins (1808), puis les alcalinoterreux. La liste des éléments chimiques s'allonge rapidement et on en connaît :

23	en	1789	(Lavoisier)
40	en	1818	(Berzelius)
49	en	1828	(")
61	en	1849	(Gmelin)
63	en	1865	(Mendéléév)

86 en 1940

105 en 1973

Il en est de même des composés chimiques dont le nombre croît beaucoup plus rapidement (on n'en connaissait que 2000 environ) ; d'où la nécessité d'introduire un symbolisme des éléments et des formules des composés par Berzelius, avec comme nouvelle base $O = 100,000$. Par la suite J.S. Stas reprendra la base $H = 1,000$; la base actuelle est le $C = 12,000$.

Une autre théorie en voie de disparition pendant la première moitié de ce siècle, est celle de la force vitale, que Berzelius soutient de sa grande autorité jusqu'à la fin de sa vie (1779-1848) : "Dans la nature vivante les éléments semblent obéir à des lois toutes différentes que dans la nature morte".

Cette théorie, qui trouvait sa justification dans l'impossibilité de reproduire en laboratoire les substances fabriquées par les êtres vivants, avait subi une première attaque, quand F. Wöller (1800-1882) réussit pour la première fois à préparer à partir des corps minéraux l'urée (1828)* ; elle résistera encore pendant quelques années, pour être définitivement abandonnée vers le milieu du siècle, par les progrès foudroyants de la chimie organique.

Quant au calorique ou élément de feu, que Lavoisier avait placé au centre de son système, il se heurte lui aussi à des difficultés grandissantes dès le début de ce siècle. En effet dès 1796 B. Thompson (comte Rumford, 1753-1814), dans une Enquête sur la Source de la Chaleur engendrée par Frottement, constate que pendant le forage d'un canon se développe une telle quantité de chaleur que le métal et l'outil deviennent brûlants ; il pense alors que la chaleur pourrait être une sorte de mouvement. Il répète son expérience sous l'eau, pour être à l'abri de l'oxygène, avec le même résultat. Quelques années plus tard, il constate que la fusion de la glace, qui absorbe une grande quantité de chaleur, donne le même poids d'eau liquide.

Définitivement le calorique ne semble pas avoir de poids.

En 1824 Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1831) par un mémoire unique, mais resté célèbre, intitulé Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance (Paris 1824, chez Bachelier, réimprimé en 1953 chez Blanchard), pose les bases de la thermodynamique moderne.

Quoique partisan de la théorie du calorique, Carnot introduit la notion de cycle et celle de réversibilité ; il montre que le rendement d'un cycle est maximum et indépendant du corps qui subit les transformations pourvu que le cycle soit décrit d'une manière réversible et ne dépend que de la température des sources.

D'après ses notes postérieures (publiées par son frère en 1887) il avait renoncé à la théorie du calorique en faveur de la théorie dynamique de la chaleur et avait même clairement formulé le premier principe de la thermodynamique :

La chaleur n'est autre chose que de la puissance motrice ou plutôt que le mouvement qui a changé de formes, c'est un mouvement. Partout où il y a destruction de puissance motrice dans les particules des corps, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite, réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice.

On peut donc poser en thèse générale que la puissance motrice est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais à proprement parler ni produite, ni détruite. A la vérité elle change de forme, c'est à-dire qu'elle produit tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie.

Ce principe se déduit pour ainsi dire tout seul de la théorie mécanique ; en effet le raisonnement nous apprend qu'il ne peut jamais y avoir de perte de force vive ou, ce qui est la même chose, de puissance motrice... D'après quelques idées que je me suis formé sur la théorie de la chaleur, la production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2.70 unités de chaleur .

Il faudra attendre J.R. Mayer (1842), un médecin, étudiant la

chaleur animale, pour recalculer la valeur J de l'équivalent mécanique de la calorie. Son article fut refusé par les Poggendorf's Annalen, mais un ami, Carl Bauer, réussit à faire passer une note dans un journal de pharmacologie, * qui attira l'attention de J.P. Joule (1818-1889), dont on connaît les résultats de 1847. Cette même année H. Von Helmholtz (1821-1894) publie la Erhaltung der Kraft, * * où le principe de la Conservation de l'Energie est énoncé, sous une forme encore confuse entre force et énergie. Ce dernier terme est dû à Young, et fut adopté par W. Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907); l'expression conservation de l'énergie a été introduite par W.J.M. Rankine (1820-1872).

Il est matériellement impossible dans le cadre que nous nous sommes fixé ici de rendre compte, ne serait-ce que très brièvement, du prodigieux développement de la physique et de la chimie pendant le XIXème siècle; force nous est donc de nous contenter de quelques coups de projecteur sur les chapitres de ces disciplines en relation avec le développement de la théorie atomique, qui jusqu'au milieu de ce siècle rencontre de vives réticences, prolongées, avec moins d'intensité jusqu'au début du XXème siècle.

Tout d'abord R. Brown (1773-1858)*, un botaniste anglais, observe pour la première fois sous le microscope (1827) le mouvement appelé depuis mouvement brownien, que W. Ramsay (1852-1916) expliqua plus tard (1876) par le choc des particules avec les molécules en perpétuelle agitation. La vérification expérimentale de cette théorie a été entreprise par J. Perrin (1908) dans une belle série d'expériences sur les émulsions en milieu liquide⁽²²⁾ et par R.A. Millikan (1868-1953) en milieu gazeux (1911)⁽²³⁾.

En 1833, M. Faraday (1791-1867) assistant, puis successeur de Davy, établit les lois quantitatives de l'électrolyse et fixe une fois pour toutes la terminologie toujours en usage de l'électrochimie naissante depuis la découverte par W. Nicholson (1753-1816) et A. Carlisle (1768-1840) de la décomposition de l'eau par le courant voltaïque (1800). Faraday constate qu'une même quantité d'électricité transporte toujours la même quantité d'ion (anion ou cation) sur les électrodes et que les poids des différents ions déposés sont en relation étroite avec leurs poids atomiques (équivalent électrochimiques). Les vues de Faraday vivement combattues par

Berzelius ne trouveront leur conclusion que vers 1880, époque à laquelle Helmholtz propose une interprétation par des atomes d'électricité liés aux atomes de matière ; ce même point de vue avait été défendu par J. Clerc Maxwell (1831-1879) dans son célèbre ouvrage On Electricity and Magnetism, où il suppose une valeur constante de la charge moléculaire appelée one molecule of electricity.*

Puis vient le développement de la théorie cinétique des gaz, oubliée depuis D. Bernoulli, avec Waterston (1845), Krönig (1865), Clausius (1857), Maxwell et Boltzman (1844-1906). Malgré ses hypothèses simplificatrices, Clausius (1822-1888) arrive à rendre compte des principales propriétés des gaz et de l'hypothèse d'Avogadro, Maxwell introduit la loi de répartition des vitesses des molécules qu'il considère comme des sphères de taille infinitésimale se repoussant suivant une loi en r^{-5} , hypothèse qui sera modifiée par van der Waals (1873).

La théorie cinétique des gaz ne donne pas seulement une interprétation cohérente des propriétés des gaz et des nouveaux arguments en faveur de la théorie atomique ; elle parvient à la détermination des grandeurs moléculaires elles mêmes et au calcul du nombre des molécules contenues dans un volume donné des gaz dont Loschmidt donne une première estimation (1865). Des calculs analogues sont faits par O.E. Meyer⁽²⁴⁾, M. Planck⁽²⁵⁾ et P. Drude⁽²⁶⁾. Ce sont finalement les belles expériences de J. Perrin⁽²²⁾ sur la détermination du nombre d'Avogadro qui ont établi sans aucun doute possible "la réalité objective des molécules et des atomes".**

Mais c'est encore et surtout l'étude des gaz qui ouvre à la physique des horizons nouveaux, depuis que A. Masson (1853) a déchargé une bobine de Ruhmkorff dans le vide d'un tube de Torricelli. J.P. Gassiot fabrique par la suite des "tubes à décharge" perfectionnés par H. Geissler, un souffleur de verre de Tübingen, auxquels J. Plücker (1801-1868) donna le nom de "tubes de Geissler" (1859). Dix ans plus tard W. Hittorf (1824-1914) observe dans ces tubes une fluorescence bleu et C.F. Varley (1828-1883) montre qu'il s'agit d'une sorte de rayonnement, pouvant être dévié par un

aimant, auquel E. Goldstein donne le nom de rayonnement cathodique,^{*} pensant qu'il s'agissait de lumière (1876). Par la suite W. Crookes (1862-1919), qui a beaucoup travaillé avec les tubes qui portent son nom, reprend le concept introduit par Faraday de "radiant matter" en y voyant des "ultimate realities, subtle, far-reaching, wonderfull". C'est le quatrième état de la matière très en vogue vers la fin du XIX siècle.

Frappé par la similitude des propriétés chimiques de certains éléments, Crookes suggère que tout élément n'est pas un corps pur, mais un complexe développé par suite d'un processus inorganique d'évolution analogue au processus darwinien ; avant cette "évolution" il n'existait qu'une protyle, sorte de matière primitive qu'en 1902 il identifie avec les électrons.

Ensuite c'est la découverte par Goldstein des rayons canaux qui conduira à la découverte du phénomène important d'isotopie.

Certes depuis la classification des éléments par Mendéléev physiciens et chimistes ont des idées assez précises sur ce que l'on appelle un élément, mais cette importante notion n'est pas facile à cerner, la nature étant un mauvais chimiste en fait de pureté, et "ce quelque chose de commun à un corps pur et à tous ses composés" présente un caractère nettement mystérieux, quoique son existence propre nous semble indiscutable, encore qu'il n'y a positivement là qu'une vue de l'esprit⁽²⁷⁾.

En effet une première confusion est née avec la découverte, par Berzelius, du phénomène de l'allotropie (soufre, phosphore, oxygène, etc) qui fait douter de l'identité parfaite de tous les atomes d'un même élément. Ensuite la difficile étude du complexe des terres-rares pose des problèmes inextricables ; l'idée sur laquelle Mendéléev avait basé son système de classification semble mise en doute et Crookes propose le nom de méta-éléments ou élémentoides pour tous les atomes d'un même élément donnant des spectres de fluorescence différents, en considérant que le poids atomique d'un élément n'est pas une constante, mais représente une moyenne des poids atomiques de plusieurs sortes d'atomes différents. Trompé par des impuretés, Crookes annonce en 1899 la découverte d'un nouvel élément, le monium ou victorium, puis, en fractionnant des sels de calcium, il pense avoir isolé

plusieurs calciums de poids atomiques différents et en 1915 il revendique la priorité à propos de la découverte des isotopes.*

Le Congrès International de Chimie, tenu à Paris (1900), proposait donc une définition de l'élément par son poids atomique et son spectre, mais l'on sait les complications qu'un spectre peut présenter selon le mode d'excitation. Le cas du plomb présentait un autre problème épineux avec son poids atomique qui était tantôt 207,20, tantôt 206,36 et tantôt 207,96 selon la provenance de l'échantillon analysé ; et ces chiffres étaient bien au-delà des erreurs expérimentales.

De même, par suite d'un grand nombre de fractionnements du néon, Aston pense (1913) avoir effectivement isolé des méta-éléments (ce dont J.J. Thomson doute fort) et ce délicat problème ne sera définitivement tranché qu'en 1919, quand Aston, à l'aide de son nouveau spectrographe de masse, a mis clairement en évidence l'existence d'isotopes des éléments stables, dont les lois de déplacement dans les filiations radioactives imposait l'existence pour les éléments radioactifs (W. Markwald, K. Fajans, A.S. Russel, F. Soddy, etc).

Finalement, en 1923, la Commission Internationale des Poids Atomiques a consacré la définition actuelle d'un élément par son Nombre Atomique, ou, ce qui revient au même, par sa place dans le tableau de Mendéléév.

Ainsi durant la seconde moitié du XIXème siècle les physiciens et les chimistes raisonnent en termes d'atomes et d'éléments qui sont considérés comme les principes constitutifs de toute matière, mais cette séduisante théorie rencontre jusqu'au début du XXème siècle des opposants déterminés et non les moindres. On avait effectivement acquis l'habitude de demander à l'expérience l'impossible, en l'occurrence de toucher du doigt les atomes avant que d'y croire. Des savants aussi réputés que Kekulé, lord Kelvin, E. Mach et W. Ostwald se refusaient de considérer les atomes comme une réalité objective ; ce dernier en particulier se flattait de tout comprendre et tout expliquer dans l'immense variété des phénomènes chimiques, sans faire appel à la théorie atomique.

Par une curieuse coïncidence cette théorie ne fut définitivement adoptée que juste au moment où lord Rutherford allait démontrer la grande complexité de structure des atomes, dont la signification étymologique d'objets insécables perdait tout son sens.

La classification périodique des Eléments. Vers le milieu du XIXème siècle le nombre d'éléments chimiques connus avait considérablement augmenté et leurs propriétés chimiques et physiques avaient été étudiées avec suffisamment de soin ; l'étude de nombreux composés chimiques laissait déjà apparaître un certain nombre de régularités et des analogies, qui ont poussé les chimistes vers un essai de classification, à commencer par les éléments.

Les nombreuses recherches dans cette direction (triades de Döbereiner, groupes de Pettenkofer, spirale de Chancourtois, tableaux d'Odling et Lothar Meyer, Octaves de Newland...) ont trouvé leur aboutissement dans le système périodique des éléments de D.I. Mendéléév (1834-1907) dans lequel "les propriétés des corps simples ainsi que les formes et les propriétés des composés chimiques des éléments montrent la dépendance périodique de leurs poids atomiques". Le tableau de Mendéléév ne contenait que 63 éléments en 1869 (première publication)⁽²⁸⁾ ; il comportait donc de nombreux vides, mais son auteur n'a pas hésité à prédire plusieurs d'entre eux et à décrire bon nombre de leurs propriétés.** "J'ose le faire", écrit-il en 1871, "dans le seul but d'avoir la possibilité, ne fût-ce qu'à l'avenir, de me convaincre définitivement et de persuader d'autres chimistes de la justesse des hypothèses qui reposent à la base de mon système, lorsque l'un de ces corps annoncés par moi aura été découvert"^{***}. Vingt ans après C. Winkler découvre le Germanium et note :

Il est peu probable qu'on puisse trouver une démonstration plus étonnante de la justesse de la théorie de périodicité que l'identification de l'ekasilicium hypothétique à cet élément nouvellement trouvé. Ce n'est pas une simple confirmation d'une théorie hardie : c'est une extension manifeste des horizons de la chimie, un grand pas en avant dans le domaine du savoir.

On ne saurait mieux dire, mais Mendéléev s'exprime encore mieux quand, après la découverte de la radio-activité naturelle qui pose le problème de la transmutation des éléments, tout en doutant sérieusement d'une telle possibilité, il écrit en 1898 :

Il serait fort intéressant d'assister à l'établissement des données prouvant les transmutations mutuelles des éléments, car je pourrais alors espérer que la cause de la loi périodique serait élucidée et comprise.

Malheureusement Mendéléev* n'a pas pu assister au triomphe total de sa découverte, dont le couronnement sera l'établissement du nombre atomique par suite des travaux de Moseley* (1913) et de la théorie de l'atome de Bohr (1913), mais son nom y restera attaché avec l'élément 101 nommé Mendélévium (Md) "pour marquer le rôle éminent du grand chimiste russe, qui le premier utilisa le tableau périodique des éléments pour prédire les propriétés chimiques des éléments non encore découverts, principe clef pour la découverte des sept derniers éléments transuraniens (actinides)...". Actuellement le tableau périodique est parfaitement comblé et s'étend jusqu'à l'élément de numéro atomique 105, mais il n'est pas exclu qu'il puisse être prolongé bien au delà.

Mais si les lois quantitatives des combinaisons chimiques nous semblent aujourd'hui constituer une des preuves les plus objectives de la réalité atomique, il n'en était pas de même pendant le XIXème siècle ou au début du XXème, et on voit Ostwald (1853-1932) se flatter de comprendre parfaitement tous les phénomènes chimiques sans avoir recours à la théorie atomique ; ce n'est qu'après les expériences de J. Perrin qu'Ostwald a été définitivement convaincu de la réalité atomique. Certains même se demandaient, en tournant en dérision les tentatives de classification des éléments, s'il ne serait pas tout aussi bon d'adopter une classification par ordre alphabétique ! Ce sont finalement les expériences de Moseley (1884-1915) sur les spectres X des éléments qui triomphèrent de toutes les réticences en montrant en même temps que la place occupée par chaque élément dans le tableau périodique était au fond plus importante que le poids atomique qui avait guidé à leur classification⁽²⁹⁾.

Une série de découvertes faites avant l'expiration du XIXème siècle va d'ailleurs singulièrement compliquer la situation : rayons cathodiques, rayons canaux, rayons X, radioactivité, autant de phénomènes bizarres, auxquels la physique classique n'est pas capable de donner une explication cohérente. Du côté théorique l'hypothèse de quanta de M. Planck (1858-1947) et la théorie de la relativité, restreinte d'abord, générale par la suite, avancée par A. Einstein (1879-1955) vont forcer les physiciens à changer jusqu'à leur manière de penser.

VIII - LE XXÈME SIÈCLE

VIII - 1. L'ELECTRON, PREMIÈRE PARTICULE FONDAMENTALE

L'étude de la décharge électrique dans les gaz a conduit à la découverte des rayons cathodiques, observés pour la première fois par Plücker (1859), et J. Perrin (1870 - 1942) montrera (1895) qu'ils sont porteurs d'une charge électrique négative; J.J. Thomson (1856 - 1940) le confirmera deux ans plus tard (déflexion magnétique) et sera étonné de la grandeur de cette charge. "I can see no escape", écrit-il, "from the conclusion that they are charges of negative electricity carried by particles of matter . The question next arises, What are these particles ? Are they atoms or molecules, or matter in a still finer state of subdivision ?". Une série d'expériences, conduites par des méthodes différentes (champ électrostatique, champ magnétique) lui permettent de dire :

"From these determinations we see that the value of m/e is independant of the nature of the gas, and that its value 10^{-7} is very small compared with the value of 10^{-4} , which is the smallest value of this quantity previously known, and which is the value for the hydrogen ion in electrolysis... The smallness of m/e may be due to the smallness of m or the largeness of e or to a combination of these two... Thus on this view we have in the cathode rays matter in a new state, a state in which the subdivision of matter is carried very much further than in the ordinary gaseous state... this matter being the substance from which all the

chemical elements are built up".

En considérant alors l'atome chimique comme un agrégat de ces "atomes primordiaux", J.J. Thomson, utilisant le modèle des "aimants flottants" de Mayer, cherche à préciser les configurations d'équilibre stable de ces particules agissant les unes sur les autres suivant une certaine loi des forces. Comme les aimants de Mayer, les corpuscules de J.J. Thomson s'arrangent en couches successives, portant des nombres variables de particules; "in fact", dit-il, "we should have something quite analogous to the periodic law"⁽³⁰⁾.

Il était donc nécessaire de déterminer directement la charge de ces corpuscules, pour lesquels G.J. Stoney (1874) avait proposé le nom d'électrons.* En utilisant la chambre à brouillard, que C.T.R. Wilson (1869-1959) venait d'inventer dans un tout autre but, J.J. Thomson entreprend (1898) ces mesures,** qui fournissent des valeurs assez dispersées; en répétant les expériences (1901-1902) il arrive à une valeur plus cohérente $e = 1,33.10^{-20}$ u.e.m. L'année suivante dans une nouvelle série de mesures effectuées avec un champ électrique accélérateur, H.A. Wilson remarque que le champ a pour effet de diviser les gouttes de brouillard en trois groupes dont les vitesses sont dans les rapports 1 : 2 : 3, le groupe lent conduisant à des valeurs de e du même ordre de grandeur que dans les expériences de J.J. Thomson. Sans entrer dans les détails expérimentaux et les nombreuses corrections, rappelons les célèbres expériences de R. Millikan (1868-1953) effectuées en 1913. Quoique les charges calculées varient entre 1 et 12 (il y a même parfois inversion du signe et un cas donnant une charge 2/3) Millikan est un expérimentateur trop habile pour se laisser tromper par quelques cas non reproductibles et il arrive à la valeur $e = 4,777.10^{-10}$ u.e.s = $1,59.10^{-20}$ u.é.m. (la valeur actuellement admise est $1,6008.10^{-20}$)⁽³¹⁾.

Les quantités e/m et e étant déterminées, on peut alors calculer

la masse de l'électron; elle se trouve être 1835 fois plus faible que celle de l'ion H^+ . J.J. Thomson montre alors par l'électromagnétisme classique que si cette masse est due à la charge électrique, elle a pour valeur (au repos) $\frac{2}{3} \frac{\mu e^2}{a}$ (où μ est la perméabilité du milieu et a le rayon de l'électron), ce qui permet d'atteindre ce que l'on appelle le rayon classique de l'électron $a = 1,875.10^{-13}$ cm.

La question de l'arrangement des électrons dans l'atome conduit J.J. Thomson à proposer un modèle de l'atome plus réaliste que les "tourbillons d'éther" de Lord Kelvin (1824-1907) ou ceux de Descartes. Par analogie avec les aimants de Mayer les électrons se disposent en couches successives à l'intérieur d'une distribution continue d'électricité positive en quantité suffisante pour assurer la neutralité de l'ensemble. Ce "plum pudding" de 1903, perfectionné en 1904⁽³²⁾ a éclipsé les tentatives précédentes de J. Perrin⁽³³⁾ et H. Nagaoka⁽³⁴⁾ de présenter un modèle "saturnien" avec la charge positive au centre et les électrons gravitant autour comme une "sorte de petites planètes"; il provoquait encore l'admiration des physiciens au Conseil Solvay de 1913, mais E. Rutherford (1871-1937) n'était pas d'accord. D'après le premier modèle de J.J. Thomson, l'atome devrait contenir des milliers et des milliers d'électrons et en vue de préciser leur nombre C.G. Barkla⁽³⁵⁾ fut chargé d'effectuer des expériences de diffusion de différentes sortes de rayonnement par les atomes (rayons X, particules β^-); le résultat fut catastrophique : le nombre d'électrons par atome était du même ordre que le poids atomique $n = 0,7-3$ fois la masse atomique). De nouvelles expériences de J.A. Crowther (1910) avec les rayons β conduisent à $n = 3A$ ⁽³⁶⁾.

Or, Rutherford, qui expérimentait depuis longtemps sur les rayonnements émis par les corps radioactifs, avait identifié les rayons β avec l'électron, puis les rayons α , qu'il avait réussi à courber et dont il avait calculé le E/M, avec l'atome d'Hélium deux fois ionisé ; il avait aussi entrepris de nombreux travaux sur l'absorption de ces rayonnements par la matière (on se rappelle les célèbres travaux de Bragg) et W. Wilson⁽³⁷⁾ trouvait (1909) une loi d'absorption des rayons β qui n'é-

tait pas exponentielle, mais de la forme $I = I_0(1-Kt)$, t étant l'épaisseur de l'absorbant. Parallèlement des expériences analogues étaient poursuivies avec les rayons α et en 1905 Rutherford constate qu'une feuille de mica de 0,003 cm d'épaisseur peut faire dévier les particules α d'un angle pouvant aller jusqu'à 2° , mais il remarque que d'autres α "too pony to photograph themselves might be deflected through a considerable greater angle".*

Ayant d'autre part remarqué que cette diffusion à grand angle a surtout lieu en fin de parcours des α , il conçoit qu'il serait possible, en faisant diminuer la vitesse des particules α , de les faire pénétrer à l'intérieur de l'atome, ce qui serait une méthode de synthèse d'atomes nouveaux. Les déviations à grand angle lui font soupçonner aussi qu'il doit y avoir quelque part dans l'atome des forces "terribles" ! Une étude plus poussée du phénomène est entreprise par Geiger qui remarque aussitôt que l'image de la fente canalisatrice des α sur un écran de ZnS devient floue par admission d'air dans l'appareil ou par interposition de minces feuilles de matière, et que les métaux lourds donnent des déviations d'un "angle appréciable" et plus grand que les métaux légers. Marsden se joint à Geiger pour poursuivre les expériences qui semblent difficiles à cause de la diffusion "sur les protubérances moléculaires des parois". Regardez donc s'il n'y a pas un effet "par réflexion directe sur le métal", suggère Rutherford. Et on constate aussitôt (après une petite modification de l'appareil) ⁽³⁸⁾ qu'environ 1 particule α sur 8000 est déviée par le platine à plus de 90° . "C'était presque aussi incroyable" dira plus tard Rutherford ⁽³⁹⁾ que si l'on tirait un obus de 375 sur une feuille de papier de soie et qu'il revint vous frapper". La théorie du scattering multiple de J.J. Thomson, n'est pas capable de rendre compte d'un tel résultat et la diffusion des α et β ne semble pas suivre la même loi. Vu par les α , l'atome semble contenir beaucoup de vide et la charge positive doit être confinée dans une toute petite région (peut-être au centre) de l'atome comme "une mouche dans une cathédrale".

C'est à partir de ce moment (1910) que Rutherford commence à formuler la théorie de la "diffusion simple" (par un seul atome). "J'ai tout calculé", écrit-il à Bragg" (40) et je trouve que le nombre des particules α qui reviennent en arrière est proportionnel à ..."; bref il trouve notre formule de Rutherford. Patient et précautionneux, Rutherford ne veut rien précipiter et dans son article de 1911 le signe de la charge de ce qui sera bientôt le noyau n'est même pas mentionné; il peut tout simplement être déterminé par l'étude du "scattering" des rayons β (41).

Cette formule célèbre

$$Q(\phi) = Q_0 \left(\frac{n \cdot e^2 \cdot E}{M \cdot v^2} \right)^2 \cdot \operatorname{cosec}^4 \frac{\phi}{2} \cdot N \cdot t$$

(ϕ = angle de déviation, N = atomes d'absorbant/cm³,
 t = épaisseur, E/M de la particule α , v sa vitesse) on la met habituellement sous la forme commode (en termes de section efficace différentielle)

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \sim \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Elle a été vérifiée par les physiciens de Manchester sous toutes ses coutures, car elle donne une foule de renseignements; établie pour des charges ponctuelles et une force en $1/r^2$, elle est valable jusqu'à des distances de 10^{-11} - 10^{-12} cm et pour des angles allant de 15° à 150° . La région du noyau est donc très réduite par rapport aux dimensions de l'atome ($\sim 10^{-8}$ cm); elle permet en plus de déterminer directement la charge Z du noyau à 1% près (J. Chadwick), comme on le voit sur le tableau I (42).

Table I.

Elément	Z calculé	Z vrai
Cuivre	29,3 ± 0,3	29
Argent	46,3 ± 0,4	47
Platine	77,4 ± 1	78

Toutes ces considérations amènent Rutherford (1911) à la formulation du modèle planétaire de l'atome, qui sera reprise un peu plus tard par N. Bohr* (1885-1962) avec les résultats que l'on sait ⁽⁴³⁾ .

VIII - 2. LE NOMBRE ATOMIQUE Z

La découverte de cet important paramètre du noyau atomique est une des plus curieuses de la physique des années 1912-1913. Comme nous l'avons vu, les expériences de J.J. Thomson (diffusion des rayons X et rayons β) auraient pu conduire à cette notion, mais la théorie classique conduisait pour le nombre n d'électrons par atome à une valeur proportionnelle au poids atomique de l'élément correspondant avec un coefficient de proportionnalité de l'ordre de 2-3 ; par contre les expériences de Manchester étaient en faveur d'une valeur plus faible $n = \frac{A}{2}$, mais la précision expérimentale n'était pas suffisante pour en tirer des conclusions définitives. La situation était assez confuse à cause des poids atomiques fractionnaires et des vides éventuels dans le tableau périodique, mais, d'après C.G. Darwin ⁽⁴⁴⁾, il semble que le groupe de Manchester était convaincu déjà depuis 1911 de l'existence d'un "nombre atomique défini en tant que charge du noyau" et L. Rosenfeld confirme que cette idée était née avec l'arrivée de Bohr à Manchester (1912), mais Rutherford était trop prudent pour la publier et on conçoit bien que Bohr n'était pas content quand A. Van den Broek ⁽⁴⁵⁾ a publié un article soutenant que les propriétés chimiques et optiques des éléments sont déterminées par leur nombre atomique Z, qui est son numéro d'ordre dans le tableau périodique et non par leurs poids atomiques; ** notons que ce terme avait été employé par Newland (1863) dans sa classification des éléments . Quoiqu'il en soit, ce nombre Z n'a pris sa vraie signification physique que grâce aux expériences de Moseley (1913) qui avait entrepris de vérifier l'hypothèse de Van den Broek. Comme il l'écrit à Bohr le résultat "fut étonnamment simple et en grande partie conforme à vos idées", mais Hevesy ⁽⁴⁷⁾ qui assistait aux conversations Moseley-Darwin-Bohr à Manchester, dit que personne ne pouvait prévoir la simplicité des résultats de ces expériences. En effet, les idées sur ce point étaient assez confuses à cette époque, car on pensait

qu'il pouvait bien exister un ou plusieurs éléments entre l'hydrogène et l'Hélium et d'autre part Nicholson ⁽⁴⁸⁾ proposait deux nouveaux éléments, corronium et nébulium et la situation était bien plus confuse dans la région des terres rares. En cette même période l'étude de la radioactivité par Rutherford et Soddy (1911) montrait qu'il existait des substances inséparables par les moyens chimiques pour lesquelles ce dernier avait proposé le nom d'isotopes ; les lois de déplacement des éléments radioactifs dans le système périodique ont été complètement élucidées grâce aux travaux de Vleck, Soddy et Fajans en 1913, mais Fajans les considérait plutôt comme un argument en défaveur du modèle de Rutherford. Comme Bohr le rappelle ⁽⁴⁹⁾ : When I turned to Rutherford to learn his reactions to such ideas (sur l'isotopie), he expressed, as always, alert interest in any promising simplicity but warned with characteristic caution against overstressing the bearing of the atomic model and extrapolating from comparatively meagre experimental evidence... On the basis of an analysis of the whole evidence then available the general relationship between the specified radioactive processes and the resulting change of the atomic number of the element was indicated by Russel in a lecture to the Chemical Society in the late autumn 1912. Quant à la proposition de Van den Broek, Bohr s'exprime ainsi : but in his classification of the elements a different nuclear charge was still ascribed to every stable or radioactive substance ⁽⁴⁹⁾. Il est certain que la question d'isotopie a été établie d'abord par les lois du déplacement radioactif, mais c'est encore J.J. Thomson ⁽⁵⁰⁾ qui a montré (1913) par la méthode des paraboles que même les éléments stables (comme le néon) possèdent cette propriété. Pour comble de la confusion sur cette question du nombre atomique nous avons encore un témoignage de Bohr qui, pendant une discussion avec Moseley et Darwin (Juin 1913) sur l'arrangement des éléments suivant leur nombre atomique (l'article de Van den Broek est de la fin 1912), a appris pour la première fois le projet de Moseley de résoudre ce problème par la mesure systématique des spectres X des éléments par la méthode de Laue-Bragg; en Novembre 1913 Bohr avait reçu les premiers résultats de Moseley et comme il le dit : In modern history of physics and chemistry, few events have from the outset attracted so general interest as Moseley's discovery of the simple laws allowing an unambiguous

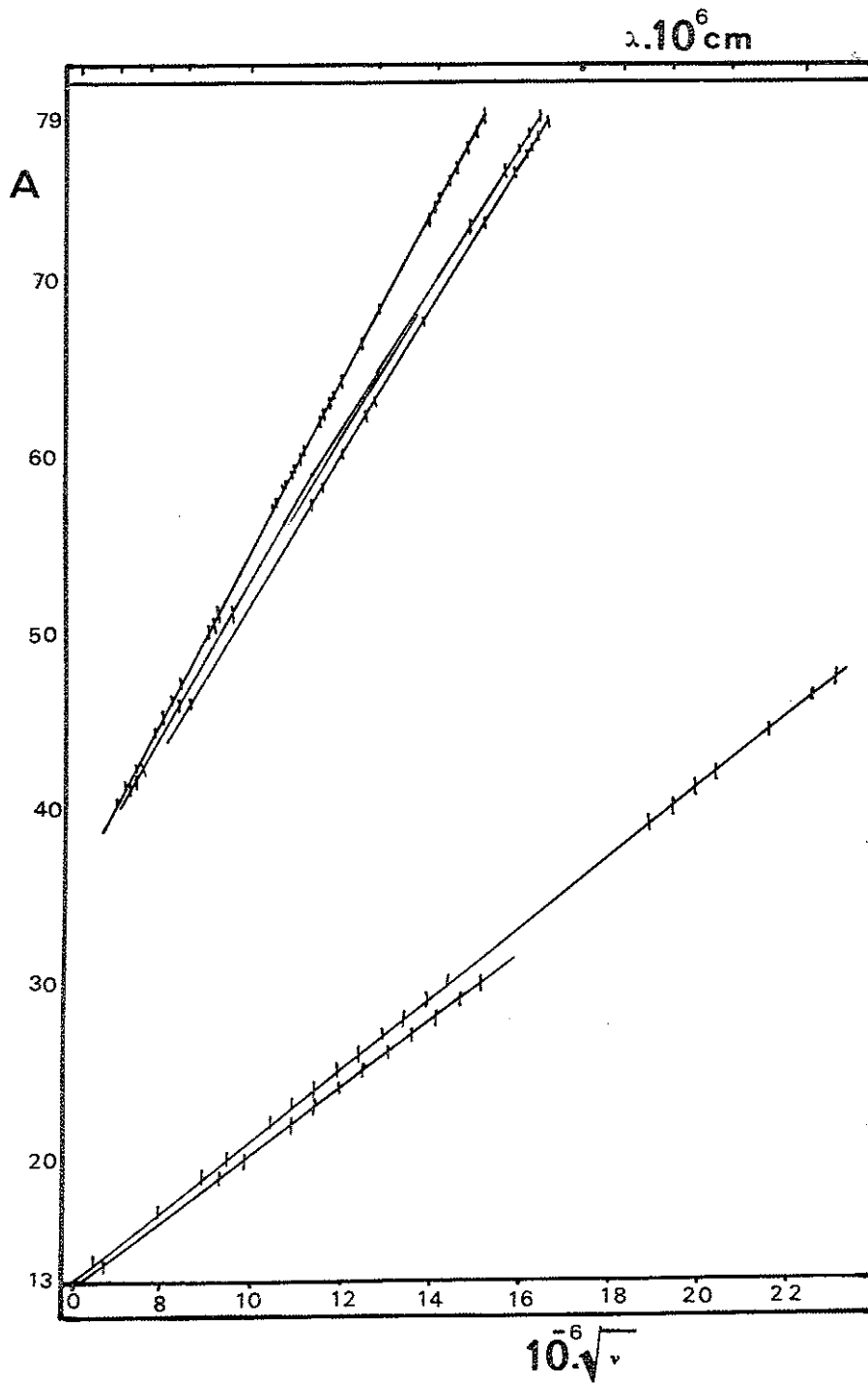


Fig. 2 Moseley entreprend d'enfermer chaque élément chimique dans sa "cage de pigeon".

H 1																	He 2				
Li 3	Be 4															B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12															Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36				
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54				
Cs 55	Ba 56	57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86				
Fr 87	Ra 88	89-103	Rf 104	Ha 105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118				
119	120	121	122																		

L A N T H A N I D E S

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

A C T I N I D E S

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------

Fig. 3 L'état actuel du tableau périodique

assignment of the atomic number to any element from his high frequency spectrum ⁽⁴⁹⁾. In particular, it was evident that Moseley's laws offered an unerring guide in the search for as yet undiscovered elements fitting into vacant places in the series of atomic numbers.

On connaît la suite, mais est-il juste, dans ces conditions, de minimiser l'importante contribution de cet "outsider" qui était le juriste d'Amsterdam, et qui fut le premier à publier un tableau périodique (assez inexact il est vrai) numéroté d'après le nombre atomique ?

De toute façon ce sont finalement les expériences justement célèbres de Moseley qui ont donné au nombre atomique sa vraie dimension, en transformant le tableau de Mendéléév en un incomparable instrument de recherche, sur lequel on peut maintenant lire, comme dans un livre, un nombre important de propriétés des éléments ⁽⁵¹⁾.

VIII - 3 LE PROTON

DEUXIEME CONSTITUANT FONDAMENTAL DE LA MATIERE

Après la découverte de la nature corpusculaire des rayons cathodiques la même question se posait pour les rayons canaux observés pour la première fois par E. Goldstein ⁽⁵²⁾ et J.J. Thomson entreprit en 1911 de mesurer leur rapport E/M par la méthode des paraboles (champ électrique et magnétique parallèles). Les premières mesures avec l'hydrogène donnèrent $E/M = 9571$ u.é.m., valeur qui est en excellent accord avec celle obtenue par électrolyse. En opérant avec du Néon, J.J. Thomson obtint deux paraboles correspondant aux masses 20 et 22 ; ce fut la découverte des premiers isotopes d'un élément stable. On sait les remarquables résultats obtenus par la suite par Aston (1877-1946), puis par d'autres (Dempster 1918, Bainbridge 1930, Mattauch 1937, Nier 1951...) , qui ont eu pour aboutissement la précision de 1 : 100.000 dans la détermination des masses atomiques ⁽⁵³⁾.

L'ion hydrogène positif, dont la masse calculée sur la base de $O = 16,000$ était de $1,00778$, n'était évidemment pas autre chose que le noyau de l'atome hydrogène, pour lequel en 1920 Rutherford a proposé le nom de proton (54).

Pour les autres éléments "la règle des nombres entiers" se trouvait vérifiée approximativement, mais il subsistait de petits écarts systématiques ($Cl^{35} = 34,9807$; $M_O^{98} = 97,946\dots$) bien supérieurs aux erreurs expérimentales. Ils furent interprétés comme des défauts de masse* $\Delta = M - A$, différence entre la masse mesurée M et le nombre de masse A de l'isotope correspondant.

Le proton venait à peine d'être découvert au moment où C.T.R. Wilson avait terminé sa nouvelle chambre plus perfectionnée que la première et munie d'un dispositif de photographie stéréoscopique des traces laissées par le passage des particules ionisantes et qui constitua pour de longues années le véritable œil de la Physique Nucléaire (55).

C'est à l'aide de ce merveilleux appareil qu'ont été observés les premiers rayons H projetés par diffusion des particules alpha sur l'hydrogène.

Ainsi vers 1912, on se trouvait dans la situation paradoxale suivante : la théorie atomique de la discontinuité de la matière venait à peine d'acquiescer des bases expérimentales solides que l'on se voyait obligé de renoncer à l'insécabilité de l'atome, qui semblait d'ailleurs posséder une structure bien compliquée. Son étude fera l'objet de la Physique Atomique, dont les étonnants résultats et leur parfait accord avec l'expérience ne tient qu'au fait, alors inconnu, que les principales propriétés des édifices atomiques ne dépendent que de l'arrangement des électrons autour du noyau.

A défaut d'autres particules connues le noyau lui-même était considéré comme un amas de protons et d'électrons (éventuellement groupés en particules alpha) ; la charge positive du noyau était donnée par le nombre des protons non appariés, tandis que des nombres égaux d'électrons et de protons de charge nette nulle rendaient compte du poids atomique; le nombre des protons libres était le même que le nombre atomique de l'atome correspondant dans le tableau périodique des éléments.

Tel était le modèle éminemment simple du noyau dont la Physique s'accommodera pendant 20 ans, jusqu'à la découverte du neutron (1932).

VIII 4 LE PHOTON

Malgré la théorie corpusculaire de la lumière qui était universellement admise à la fin du XVIIème siècle, des changements considérables se produisent déjà en 1690 avec la proposition d'une interprétation ondulatoire des phénomènes lumineux par Christian Huygens (1629-1695). Froidement accueillie au début, la théorie ondulatoire finit par s'imposer avec T. Young (1773-1829) et Aug. Fresnel (1788-1827); comme seule capable d'expliquer les phénomènes de diffraction et d'interférences. Mais, malgré ses éclatants succès, la théorie ondulatoire se heurta à des difficultés insurmontables devant les phénomènes de l'émission et de l'absorption du rayonnement, où elle se trouvait complètement en défaut. Le spectre de l'atome le plus simple (hydrogène) était en contradiction flagrante avec l'électrodynamique classique, mais les premières difficultés ont surgi de considérations étrangères à celles des spectres optiques et notamment à propos du rayonnement thermique du corps noir. Pour rendre compte de la distribution de ce rayonnement, Max Planck (1858-1947) adopte l'hypothèse, apparemment anodine ⁽⁵⁶⁾ que l'émission (et l'absorption) du rayonnement thermique par la matière n'a pas lieu de façon continue, mais par quanta finis d'énergie $h\nu$, proportionnelle à la fréquence du rayonnement en question ($h = 6,62.10^{-27}$ erg.sec. étant une constante), ce qui le conduit pour la distribution spectrale à la célèbre formule :

$$u_{\nu} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{\epsilon_0}{\exp(\epsilon_0/kT) - 1}$$

qui est en excellent accord avec l'expérience d'une part et d'autre part évite la catastrophe ultraviolette, l'intégrale $u = \int_0^{\infty} u_{\nu} d\nu$ n'étant plus divergente. La formule de Planck est parfaitement compatible avec la loi de déplacement de Wien si l'on pose $\epsilon_0 = h\nu$. L'intensité du rayonnement est alors maxima pour une longueur d'onde λ_{\max} donnée par la relation :

$$\frac{k}{hc} \lambda_{\max} T = C = 0,2014$$

La loi de Planck a rencontré, on s'en doute, une forte opposition de la part des physiciens, qui considéraient l'hypothèse quantique comme un artifice mathématique devant être interprété dans le cadre des théories classiques. Mais toutes les tentatives dans ce sens ont complètement échoué. Après de longues discussions sur la théorie de Planck, l'étape suivante a été accomplie par A. Einstein (1879-1955), qui reconnut en 1905 que des phénomènes autres que celui du rayonnement du corps noir, comme l'effet photoélectrique (Hertz (1887) et le comportement des chaleurs spécifiques des solides (Loi de Dulong et Petit), inconciliables avec la théorie classique, trouvaient une explication naturelle avec l'hypothèse des quanta de lumière (= photons), possédant une énergie $\epsilon = h\nu$ et une quantité de mouvement $p = \frac{h\nu}{c}$ (57) *.

Un autre phénomène inexplicable par la théorie classique du rayonnement fut découvert en 1922 par A. Compton (58), qui, étudiant la diffusion des rayons X par la matière (paraffine), a constaté un changement de longueur d'onde du rayonnement incident :

$$\Delta\lambda = 2\lambda_0 \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}, \text{ avec } \lambda_0 = \frac{h}{mc} = 0,0242 \text{ \AA} ;$$

changement qui est indépendant de cette longueur d'onde et dont la théorie classique ne pouvait pas rendre compte, puisqu'elle prévoit que, pour un

angle de diffusion inférieur à 90° , la fréquence de l'onde diffusée doit être supérieure à celle de l'onde incidente.

La formule précédente a été interprétée par Compton et Debye en considérant la diffusion comme un choc élastique du photon incident sur un électron, choc pendant lequel le photon d'énergie $h\nu$ communique une partie de celle-ci à l'électron et en sort avec une énergie $h\nu' < h\nu$. Le rayonnement se comporte donc dans l'effet Compton comme s'il était constitué de corpuscules ayant une énergie et une quantité de mouvement bien déterminées, les photons. C'est le nom que proposa G.N. Lewis en 1926 pour ce nouvel atome hypothétique qui n'est pas de la lumière, mais joue un rôle essentiel dans tout processus de rayonnement ⁽⁵⁹⁾.

Mais alors comment concilier les phénomènes d'interférences et de diffraction avec l'aspect corpusculaire du rayonnement ? Le paradoxe était de taille et aucun argument ne pouvait résoudre une contradiction aussi fondamentale.

Qui plus est, en 1923 C.J. Davisson et Kunsman ⁽⁶⁰⁾, en étudiant la distribution de l'intensité des électrons traversant la matière, constatent des fluctuations de l'intensité, confirmées par Dumond ⁽⁶¹⁾ et dont W.E. Elsasser ⁽⁶²⁾ essaie de rendre compte théoriquement. Mais sur ce point les expérimentateurs ont été devancés par les théoriciens. En effet, depuis 1923, Louis de Broglie, conduit par des considérations sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre, conçoit l'audacieuse hypothèse qu'à toute particule d'impulsion p il est possible d'associer une onde de longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{p}$, dont la vitesse de propagation (vitesse de groupe) peut s'identifier à la vitesse de la particule, tandis que la vitesse de phase $U = \frac{c}{v}$ est supérieure à la vitesse de la lumière (ondes supralumineuses). On sait l'extraordinaire développement des idées de de Broglie par E. Schroedinger ainsi que les brillantes théories de W. Heisenberg d'une part et de P.A.M. Dirac de l'autre et, pour ne pas trop nous éloigner de notre sujet, qu'il suffise de rappeler les belles expériences de Davisson et Germer ⁽⁶³⁾, de G.P. Thomson et A. Reid ⁽⁶⁴⁾ (1927, M. Ponte ⁽⁶⁵⁾ et d'autres ⁽⁶⁶⁾, qui ont confirmé d'une manière

éclatante l'existence des ondes matérielles (diffraction des électrons par les cristaux). J.V. Hughes (1935) a réussi à calculer la longueur d'onde de ces particules avec toute la précision désirable et vérifier la relation fondamentale de de Broglie pour des vitesses des électrons comparables à celle de la lumière.

Après l'introduction du spin par Uhlenbeck et Goudsmit (1925) ⁽⁶⁷⁾, l'ensemble des particules connues a été partagé en deux classes, suivant qu'ils obéissent à la statistique de Bose-Einstein, qui ne fait pas appel au principe de Pauli ⁽⁶⁸⁾, ou à celle de Fermi-Dirac avec fonctions d'ondes antisymétriques obéissant à ce principe.

Ainsi pour cette période qui va grosso-modo de 1900 à 1932 nous avons en tout et pour tout trois particules : l'électron, le proton et le photon dont les deux premières sont considérées comme fondamentales (dans le sens de constituants universels de la matière), tandis que la troisième a un statut hybride entre la matière et l'énergie. Le tableau suivant résume leurs principales propriétés :

Table II.

Particule	Symbole	Masse en MeV	Charge	Spin	Statistique
Electron	e	0,511	-1	1/2	Fermi-Dirac
Proton	p	938,23	+1	1/2	" "
Photon	γ	0,0	0	1	Bose-Einstein

VIII - 5 UNE SCIENCE NOUVELLE : LA PHYSIQUE NUCLEAIRE.

Avant de poursuivre cet exposé sur les particules élémentaires, il est nécessaire de faire un court retour en arrière afin de poursuivre ne serait-ce que très rapidement le développement des idées. Nous en étions restés à l'établissement de la formule de Rutherford (1911) et de son modèle de l'atome dont la charge du noyau n'est pas encore précisée. " I am beginning to think", écrit Rutherford à Bragg, "that the central core is negatively charged, for otherwise the law of absorption for beta rays would be very different from that observed...". Dans la même lettre Rutherford exprime ses doutes quant à la conservation de l'impulsion "in all cases". Néanmoins il semble plutôt en faveur d'une charge positive du noyau Ne au centre "surrounded by a distribution of negative electrons Ne uniformly distributed within a sphere of radius R" ; il était en effet impossible de comprendre comment les électrons pouvaient être retenus dans l'atome à noyau négatif et les particules α devaient bien être repoussées par le noyau et avoir une trajectoire hyperbolique.

Mais Rutherford est trop prudent pour trancher la question en hâte : "it is not yet possible to determine whether the central charge was positive or negative". En tout cas dans la troisième édition de Radioactive Substances and their Radiations (p. 619, 1913), on lit que " the single large scattering of α particles could be satisfactory explained by supposing that the atom consisted of a concentrated positive charge at its centre and surrounded by a distribution of electrons to render it electrically neutral".

La première guerre mondiale (1914-1918) a presque complètement paralysé ce genre de recherches, la plupart des physiciens (y compris Rutherford) ont été dispersés ou appelés à d'autres tâches. Moseley fut tué aux détroits de l'Hellespont et Chadwick, qui était allé à Berlin travailler avec Geiger, ne pouvait se douter qu'il allait être interné pour toute la durée de la guerre. Ainsi l'acte de naissance de la Physique Nucléaire a été repoussé jusqu'à 1919, époque à laquelle Rutherford quitte

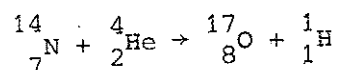
Manchester pour succéder à J.J. Thomson au Cavendish Laboratory. C'est dans le volume 37 de Philosophical Magazine qu'ont paru les quatre articles de Rutherford sur la "transmutation de l'azote". Voici comment son assistant G.R. Grove a raconté l'histoire à A.S. Eve (69) :

He was shooting protons out of light atoms by means of alpha particles ; carbons could not play. The next day was the turn of aluminium, and on some theoretical grounds Rutherford thought that the protons would have high velocity and a long range. " Now, Grove, have some mica absorbers ready to-morrow with stopping power equivalent to 50 cms of air".
"Yessir".

On the next day : "Now, Grove, put in a 50 cms screen".

- "Yessir".
- "Why don't you do what I tell you - put in 50 cms screen".
- "I have sir".
- "Put in 20 more".
- "Yessir".
- "Why the devil don't you put in what I tell you, I said 20 more".
- "I did sir".
- "There's some damned contamination".
- "Put in two 50's".
- "Yessir"
- "Ah, it's all right, that's stopped'em !
Grove, my boy, you're always wrong until I've proved you right !
Now we'll find their exact range !".

C'est dans ces circonstances qu'a été établie la fameuse réaction :



qui est l'événement fondamental de la Physique Nucléaire.

L'idée n'était certainement pas neuve, car Rutherford, du temps où il était encore à Manchester, rêvait à la synthèse d'atomes nouveaux par bombardement par des particules α ; il avait même effectué certaines expériences, qui n'avaient pas abouti à cette époque. En effet, dans l'édition de 1913 de Radioactive Substances and their Radiations, on lit encore (p. 623) : In a similar way, it might be anticipated that lead when bombarded by α particles might give rise to polonium, but no detectable effect was noted in experiments made by the writer. In 1917 (donc avant son arrivée à Cambridge) Rutherford écrivait à Bohr I am detecting and counting the lighter atoms set in motion by α particles, and the results, I think, throw a good deal of light on the character and distribution of forces near the nucleus. I am also trying to break up the atom by this method.

Plusieurs autres éléments légers sont alors soumis aux rayons α et les résultats sont analysés à l'aide des photographies prises à la chambre de Wilson par P.M.S. Blackett; voici comment Rutherford s'exprime dans une leçon à la Royal Institution (10 Avril 1925) : P.M.S. Blackett at the Cavendish Laboratory had succeeded in taking photographs of an alpha particle which struck a nitrogen nucleus and remained inside, throwing out a proton, as a cuckoo ejects a fledgeling from its nest... To Blackett thus belong the great credit of having been the first to prove the synthesis, of building up, a heavier atom from a lighter one.

On sait le prodigieux développement de cette nouvelle physique après la brèche ouverte par Rutherford en 1919, mais il convient de rappeler que pendant de longues années la particule α reste le seul projectile disponible et que son énergie ne peut pas dépasser 8 MeV, une énergie aujourd'hui ridicule devant les centaines de GeV des derniers accélérateurs. Quant aux appareils expérimentaux, on ne s'en rend plus compte, mais ils étaient d'une étonnante simplicité. "I can well remember being surprised, in fact wildly shocked, that the apparatus was not more impressive" écrira plus tard C.D. Ellis après sa première visite au laboratoire de Rutherford.

L'incroyable découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Fred Joliot (1934) ouvrira des perspectives nouvelles aux conséquences incalculables, dont on connaît l'aboutissement; on peut ainsi clore ce premier chapitre vers 1930 avec un registre à trois particules élémentaires :

Electron

Proton

Photon

VIII - 6 LE NEUTRON, DEUXIEME CONSTITUANT DU NOYAU.

L'existence dans la nature d'une particule neutre avait été suggérée dès le début du XXème siècle par Nernst (1864-1941), qui en 1903 désigne du nom de neutron un assemblage d'un électron et d'une charge positive égale possédant beaucoup de propriétés de l'éther ⁽⁷¹⁾; cette idée est souvent reprise par la suite (Bragg, Ono, Fournier, St. Mayer) sous des formes différentes, mais ce n'est qu'en 1920 que Rutherford formule nettement ⁽⁷²⁾ l'hypothèse qu'un proton et un électron pourraient s'unir d'une manière plus intime qu'ils ne le font avec l'atome d'hydrogène, pour former une particule de charge nulle et d'une masse approximativement égale à celle de l'atome d'hydrogène. J. Chadwick dans sa conférence Nobel (1935) a rappelé les paroles de Rutherford : Under some conditions, however, it may be possible for an electron to combine much more closely with the H nucleus, forming a kind of neutral doublet. Such an atom would have very novel properties. Its external field would be practically zero, except very close to the nucleus, and in consequence it should be able to move freely through matter. Its presence would probably be difficult to detect by the spectroscope, and it may be impossible to contain it in a sealed vessel. On the other hand, it should enter readily the structure of atoms, and may either unite with the nucleus or be disintegrated by its intense field.

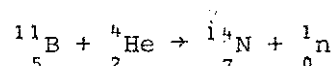
Les expériences effectuées au Cavendish Laboratory en vue de mettre en évidence la formation d'une telle particule pendant la décharge électrique dans l'hydrogène n'ont pas conduit au résultat escompté ⁽⁷³⁾, mais les physiciens de Cavendish ne perdent pas de vue l'hypothétique neutron. En Septembre 1924, Chadwick écrit à Rutherford :

"I think we shall have to make a real search for the neutron. I believe I have a scheme which may just work but I must consult Aston first..."

Différentes tentatives faites par Rutherford et Chadwick dans ce but ont donné ⁽⁷³⁾ des résultats négatifs, quand une expérience effectuée par W. Bothe et H. Becker montre que le béryllium bombardé par les particules α donne naissance à un rayonnement très pénétrant (il traversait facilement 10 cm de Plomb) ⁽⁷⁴⁾; ils crurent d'abord qu'il s'agissait d'un rayonnement de nature électromagnétique de grande énergie (intermédiaire entre celle des rayons γ les plus durs et du rayonnement cosmique) mais de faible intensité. Le même effet était d'ailleurs observé avec d'autres éléments légers, mais il était particulièrement intense avec le béryllium. Ces expériences furent reprises aussitôt à Paris par I. Curie (1897-1956) et F. Joliot (1900-1958), qui disposaient de fortes sources de Polonium; l'effet observé par Bothe et Becker était bien confirmé et l'étude de l'absorption dans le Plomb montrait que, s'il s'agissait d'un rayonnement γ , celui-ci devait avoir une énergie de 15 MeV. L'étude plus poussée de l'absorption de ce curieux rayonnement par différentes substances leur permet de constater le fait inattendu que le courant d'ionisation mesuré en interposant des substances hydrogénées (paraffine, eau, cellophane) était beaucoup plus grand qu'avec le Carbone, l'Aluminium ou le Cuivre (à masses superficielles égales). Ils montrèrent ensuite que l'augmentation du courant d'ionisation était due à la projection de protons de grande énergie, pouvant atteindre un parcours de 70cm d'air. Tout semblait montrer qu'il s'agissait "d'un nouveau mode d'interaction de ce rayonnement et de la matière", car il n'était pas possible d'interpréter le phénomène comme un effet COMPTON d'un rayonnement γ ⁽⁷⁵⁾.

Des expériences du même genre se poursuivent activement à Cambridge par J. Chadwick et ses collaborateurs, qui confirment les résultats

de Curie et Joliot ; l'énergie de ce rayonnement semble être d'autant plus grande que la masse des atomes projetés était plus lourde, contrairement aux lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. C'est alors que Chadwick avance l'hypothèse du neutron ⁽⁷⁶⁾ dont il calcule la masse, qui semble au début de l'ordre de 1,15 fois la masse du proton. L'application des lois de conservation à la réaction



donne une valeur de $1,0067 \pm 0,0005$ unités de masse, légèrement inférieure à celle du proton $m_p = 1,00758$ u.m). Par suite d'un grand nombre de réactions plus sûres, il s'avère que la masse du neutron $m_n = 1,00893$ est au contraire légèrement supérieure à celle du proton (photo-désintégration du deuton).

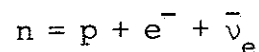
Pour Chadwick, l'hypothèse du neutron ne donne pas seulement une interprétation immédiate et simple des différents faits expérimentaux ; "elle jette en même temps une nouvelle lumière sur le problème de la structure nucléaire".

L'hypothèse de Chadwick est aussitôt confirmée par I. Curie et F. Joliot , devancés d'une semaine par Chadwick dans la course au neutron. Il n'en faut pas plus à W. Heisenberg pour entreprendre immédiatement la construction d'une théorie du noyau. Nous y reviendrons.

La découverte du neutron fut pour l'ensemble de la Physique Nucléaire un événement d'une portée considérable. Elle oblige à une révision radicale des idées en cours sur la constitution des atomes (noyau). De plus le neutron se révèle être un projectile de choix pour des réactions nucléaires nouvelles, parmi lesquelles la capture radiative (absorption du neutron avec émission d'un γ) n'est pas la moins importante. C'est par cette réaction qu'il a été possible de créer le premier élément transuranien (Neptunium).

Ces études, inaugurées par Fermi en 1932, ont conduit à la découverte du phénomène de la fission du noyau atomique par Otto Hahn et F. Strassmann⁽⁷⁷⁾ et de là au cercle infernal des bombes atomiques dont nous n'avons pas à nous occuper ici, mais qui constituent pour autant une épée de Damoclès au-dessus de la tête de l'humanité.

La physique du neutron a connu, sous l'impulsion de Fermi, un développement considérable par suite des études sur les applications militaires de l'énergie atomique et de leurs nombreuses applications dans les domaines les plus divers. Il est donc impossible d'en rendre compte ici. Nous nous contenterons donc de signaler seulement que le neutron libre (non engagé dans un noyau) est instable, se désintégrant spontanément avec une vie moyenne de 918 ± 14 s. suivant le schéma :



Cette désintégration a été mise en évidence en 1948 auprès d'un réacteur nucléaire par identification du proton de désintégration, par A.H. Snell et L.C. Miller (Phys. Rev. 74, 1217, 1948 ; voir aussi J.M. Robson, Phys. Rev. 77, 347, 1950 ; 78, 311, 1950 ; A.H. Snell, F. Pleasonton, R.V. Mc Cord, Phys. Rev. 78, 310, 1950 et C.J. Christensen et al. Phys. Rev. D5, 1628, 1972).

Par contre le proton semble être extraordinairement stable; on estime que sa vie moyenne est de l'ordre de 10^{30} a , donc bien supérieure à l'âge de l'Univers (~ 5 milliards d'années). C'est une estimation récente de Reines F. et Crough M.F. (Phys. Rev. Letters, 32, 493, 1974).

VIII - 7 L'ELECTRON POSITIF.

Le rayonnement cosmique dont l'étude avait commencé au début du XXème siècle devait jouer par la suite un rôle de tout premier plan en ce qui concerne la physique des particules ; en effet, la plupart de ces particules nouvelles ont été découvertes dans ce rayonnement d'origine tou-

jours mystérieuse, arrivant sur la terre des espaces "cosmiques" à une cadence (heureusement) très faible. En étudiant ce rayonnement à l'aide d'une chambre de Wilson munie d'écran de 6mm de Plomb et plongée dans un champ magnétique de 15.000 Gauss, Carl D. Anderson* a trouvé sur plus de 1 000 photographies, un cliché remarquable⁽⁷⁸⁾ : une particule cheminant de bas en haut avec une énergie de 63 MeV traversait l'écran de Plomb de 6mm et ressortait avec une énergie de 23 MeV de l'autre côté, nettement plus courbée et dans le sens contraire de celui d'un électron.

Comme cette particule traversait encore au moins 5 cm d'air dans la chambre (un proton de la même énergie ne pourrait parcourir que 5 mm seulement) elle avait une masse beaucoup plus faible que le proton et à 20% près égale à celle de l'électron.

Après l'étude d'une quinzaine de clichés analogues, Anderson conclut qu'il s'agissait d'électrons positifs, nommés positrons ; il ajoute : "The greater symmetry, however, between the positive and negative charges revealed by the discovering of the positron should prove a stimular to search for evidence of the existense of negative protons!" Blackett et Occhialini⁽⁷⁹⁾ trouvent la même particule dans les gerbes cosmiques et donnent pour sa masse la valeur

$$m_{e^+} = (1,02 \pm 0,10)m_{e^-}$$

De leur côté I. Curie et F. Joliot** confirment la découvert d'Anderson et, en interposant du plomb et de la paraffine au rayonnement du béryllium, ils mesurent le rendement en positrons en fonction de l'épaisseur de l'absorbant. Ils arrivent ainsi à la conclusion que les positrons sont dus au rayonnement γ plutôt qu'aux neutrons (matérialisation). Plusieurs autres chercheurs confirment ces résultats et la découverte de la radio-activité artificielle montre aussitôt que des positrons sont aussi émis par de nouveaux radioéléments artificiels (1934) , qui sont positogènes (e^+) ou néгатогènes (e^-)⁽⁸⁰⁾.

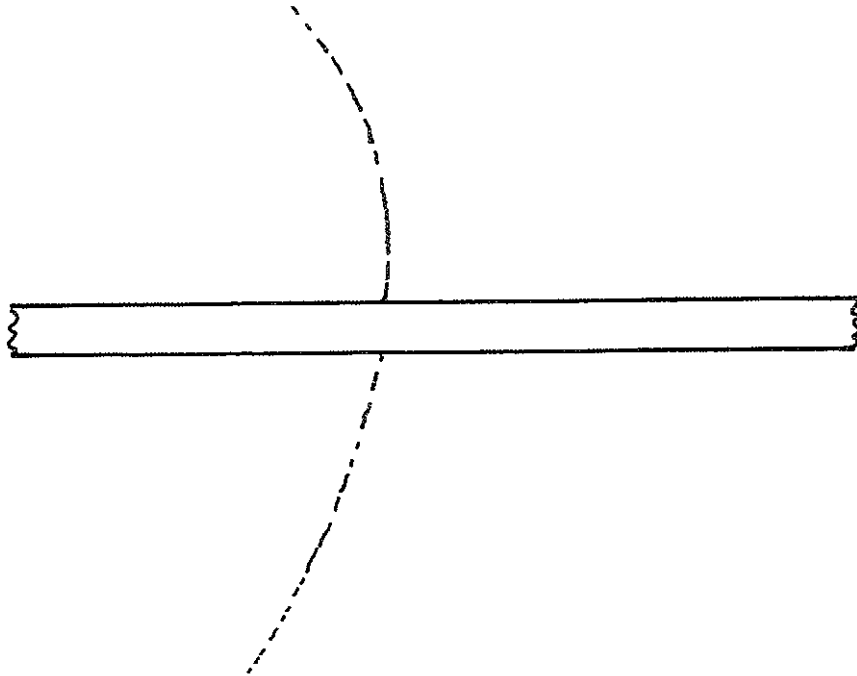


Fig. 4 : Cliché de l'électron positif (C. Anderson).
La particule chemine de bas en haut et après
une perte d'énergie à la traversée de l'écran
elle se trouve plus courbée par le champ magné-
tique (perpendiculaire au plan de la figure)
dans le sens contraire de celui d'une particule
négative.

Il s'agissait donc bel et bien de la contrepartie de l'électron négatif; cela faisait ainsi disparaître la désagréable asymétrie entre l'électricité négative et positive, qui inquiétait les physiciens dès le début du siècle et dont Rutherford avait anticipé l'existence dix ans auparavant (1922), sans qu'il y ait la moindre indication du côté expérimental sur l'existence d'une telle particule.

Mais ici encore les expérimentateurs ont été devancés par les théoriciens. En effet, en établissant la théorie relativiste de l'électron, Dirac s'aperçoit que l'équation qui porte son nom possédait deux fois plus de solutions qu'il n'était nécessaire pour la description de l'électron, et dont la moitié correspondait à des états d'énergie cinétique négative, qui semblaient n'avoir aucune signification physique. Il aurait donc pu rejeter ces solutions indésirables mais cela non plus ne le satisfaisait pas. Voici comment il décrit la situation :

Dans la théorie quantique il peut se produire des transitions discontinues, un électron initialement dans un état d'énergie cinétique positive pouvant effectuer une transition vers un état à énergie négative. Il n'est donc plus permis d'échapper à la difficulté en ignorant simplement les états à énergie négative, comme on le fait dans la théorie classique. En effet, la fonction complexe conjuguée de toute solution de l'équation d'onde est aussi solution, mais, au lieu de correspondre à une énergie positive, elle conduit à une énergie négative. Par conséquent, cette fonction complexe conjuguée représente un électron de charge +e au lieu de $-e$, mouvant dans un champ électromagnétique donné.

Nous sommes ainsi amenés à déduire de ce qui précède que les solutions à énergie négative se rapportent au mouvement des protons ou noyaux d'hydrogène, quoiqu'il subsiste encore la difficulté de la grande différence des masses. Nous ne pouvons cependant pas affirmer simplement que les solutions à énergie négative représentent des protons, car les relations dynamiques seraient complètement faussées; par exemple il n'est certainement pas vrai qu'un proton possède une énergie cinétique négative.

Il nous faudra par conséquent imaginer ces protons sur un plan quelque peu différent. Nous ferons pour cela l'hypothèse que presque tous les états à énergie négative sont occupés, avec un électron dans chaque état, comme l'exige le principe de Pauli. Un état d'énergie négative inoccupé apparaîtra alors comme quelque chose ayant une énergie positive, puisque pour le faire disparaître, c'est-à-dire pour le remplir, il faudra lui ajouter un électron d'énergie négative. Nous faisons l'hypothèse que les états d'énergie négative inoccupés sont des protons.

Le principe de Pauli jouera pour empêcher un électron d'énergie positive de tomber dans des états d'énergie négative. Il sera encore possible, cependant, pour un tel électron, de tomber dans un état inoccupé d'énergie négative. Dans ce cas un électron et un proton disparaîtraient simultanément, leur énergie étant émise sous forme de radiation. Très probablement de tels processus se produisent effectivement dans la nature.

La théorie que nous venons d'esquisser fournit des modèles symétriques pour le proton et l'électron. Cette symétrie n'est pas mathématiquement parfaite, comme on peut le vérifier aisément, quand on tient compte des interactions entre électrons. Cependant, cette cause semble, d'après les idées actuelles, difficilement suffire à rendre compte des différences très considérables observées entre les électrons et les protons, et en particulier de la différence de leurs masses. Il est possible que la solution de cette difficulté se trouve dans une meilleure compréhension de la nature de cette interaction ⁽⁸¹⁾.

Pour le moment (1930) la matière se compose, pour Dirac, "d'électrons et de protons"; quant au problème des énergies négatives : "It was an imperfection of the theory and I didn't see what could be done about it. It was only later that I got the idea of filling up all the negative energy states. I felt right at the start that the negative energy electrons would have the same rest mass as the ordinary electrons...

I hoped that there was some lack of symmetry somewhere which would bring in the extra mass for the positively charged ones. I was hoping that in some way the Coulomb interaction might lead to such an extra mass, but I couldn't see how it could be brought about ⁽⁸²⁾.

L'année suivante (1931) H. Weyl écrivait encore : "the dissimilarity of the two kinds of electricity thus seems to hide a secret of Nature which lies yet deeper than the dissimilarity of past and future" ⁽⁸³⁾.

Mais en ce moment Dirac abandonne l'interprétation des trous par les protons : "A hole, if there were one, would be a new kind of particle, unknown to experimental physics, having the same mass and opposite charge to an electron. We may call such a particle an anti-electron" ⁽⁸⁴⁾.

C'était à peu près une année avant la découverte d'Anderson.

L'existence de l'électron positif était donc bien prédite par Dirac, qui a précisé sa pensée dans sa conférence Nobel (1933) : Etant donné que les positrons observés dans la nature ont des énergies cinétiques positives :

We can, however, establish a connection between electrons in negative-energy states and positrons, in a rather more indirect way.

We make use of the exclusion principle of Pauli, according to which there can be only one electron in any state of motion. We now make the assumptions that in the world as we know it, nearly all the states of negative energy for the electrons are occupied, with just one electron in each state, and that an uniform filling of all the negative-energy states is unobservable to us. Further, any unoccupied negative energy state, being a departure from uniformity, is observable and is just a positron.

An unoccupied negative energy state, or hole, as we may call it for brevity, will have a positive energy, since it is a place where there is a shortage of negative energy. A hole is, in fact, just like an

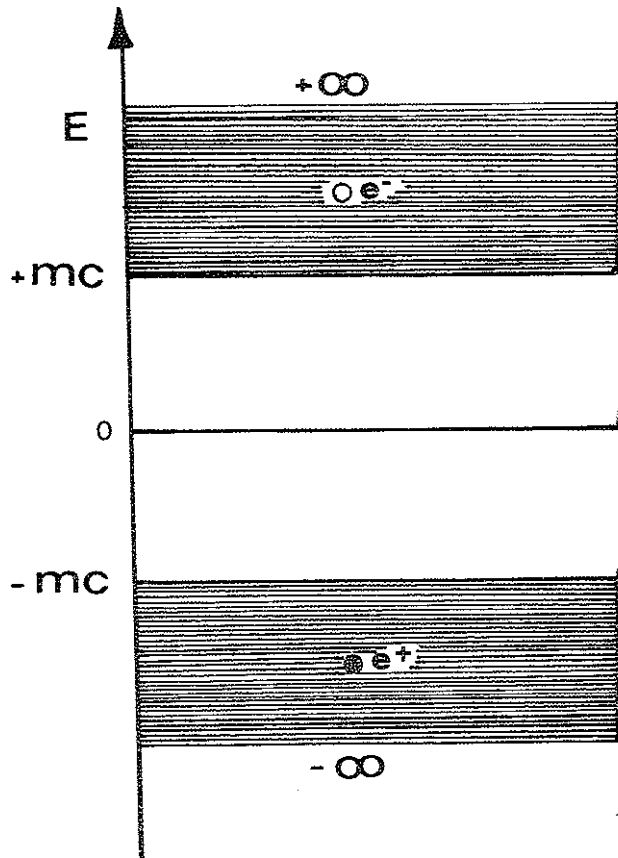


Fig. 5 Un trou (positron) et un électron négatif selon Dirac.

ordinary particle, and its identification with the positron seems the most reasonable way of getting over the difficulty of the appearance of negative energies in our equations. On this view the positron is just the mirror image of the electron, having exactly the same mass and opposite charge."

From our theoretical picture, we should expect an ordinary electron, with positive energy, to be able to drop into a hole and fill up this hole, the energy being liberated in the form of electromagnetic radiation. This would mean a process in which an electron and a positron annihilate one another. The converse process, namely the creation of an electron and a positron from electromagnetic radiation, should be able to take place.

La situation particulière dans laquelle la distribution des électrons est telle que tous les états à énergie négative sont occupés et tous les états à énergie (cinétique) positive sont libres, a reçu le nom de vide électronique. Si un électron négatif de charge e^- et d'énergie négative $E = -|E|$ et impulsion \vec{p} est soustrait de cette mer d'électrons, le système se trouve dans un état d'énergie $E = -E = |E|$, avec une impulsion $\vec{p} = -\vec{p}$ et une charge électrique $e^+ = -e^-$, donc positive; le trou ainsi créé se comporte (pour toute observation) comme un électron positif d'impulsion $\vec{p} = -\vec{p}$ et d'énergie $|E|$, toutes deux positives, comme il se doit, si un tel état doit correspondre à une observable.

Si maintenant cet ensemble constituant la mer d'électrons d'énergie négative se trouve placé dans un champ électrique, qui interagit avec les électrons, un de ces électrons d'énergie E et d'impulsion \vec{p} peut subir une transition vers un état d'énergie E' et d'impulsion p' . On est alors en présence d'une paire d'électrons aux caractéristiques :

- a) Energie : $E_+ = -E = |E|$, impulsion : $\vec{p}_+ = -\vec{p}$; (e^+)
- b) " " $E_- = E'$ " $\vec{p}_- = \vec{p}'$; (e^-)

On peut calculer que le taux d'une telle transition (de l'énergie $-m_e c^2$ à l'énergie $+m_e c^2$) est de l'ordre de $\nu = \frac{2\alpha^2}{\pi} \cdot \frac{m_e c^2}{\hbar} = 10^8 \text{ sec}^{-1}$.

C'est le phénomène de création de paires e^+e^- .

De même un trou e^+ se comporte comme un piège pour un électron (e^-) d'énergie positive et les deux s'annihilent en donnant deux quanta de rayonnement, qui ont une énergie de 0,511 MeV chacun ⁽⁸⁵⁾.

Dans un tel processus le nombre total des particules n'est pas conservé, mais la charge électrique l'est.

Plus récemment R. Feynman ⁽⁸⁶⁾ a donné une autre interprétation des états à énergie négative; il considère qu'un tel état représente un électron remontant le temps, ce qui revient à inverser le signe de la charge; un électron remontant le temps se comporte alors comme un positron avançant dans le temps. Ainsi, par exemple, "un observateur parcourant le temps dans le sens ordinaire et conscient du passé et du futur voit à l'instant t_1 un électron au point x_1 se dirigeant vers le point x_2 ; à l'instant t_2 , postérieur à t_1 , cet électron existe toujours, mais quelque part ailleurs une paire électron-positron est formée. A un autre instant t_3 postérieur, l'électron initial coexiste avec une paire e^+e^- nouvellement arrivée, mais le e^+ rencontrant le e^- initial, s'annihile et seul l'électron e^- créé reste; enfin à l'instant t_4 on est en présence d'un seul électron" (fig. 6).

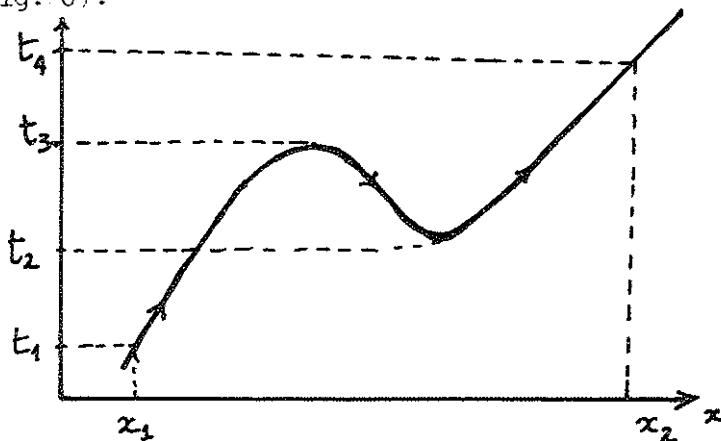


Fig.6

VIII - 8 VERS UNE THEORIE DU NOYAU

Nous avons vu que depuis la formulation du modèle atomique par Rutherford et Bohr, le noyau de l'atome était considéré comme un amalgame de protons et d'électrons, mais à partir de 1923, cette théorie commence à se heurter à des difficultés, qui peu à peu semblent insurmontables, et la nouvelle mécanique ne fait qu'accentuer ces difficultés.

Résumons-les :

1) La mécanique ondulatoire attribuée à un électron d'impulsion p une longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0c^2 E + E^2}}$, où E est l'énergie cinétique de l'électron ; si des électrons existent dans le noyau, dont le rayon est de l'ordre de $r \simeq 10^{-13}$ cm, ils doivent se trouver dans un état stationnaire et par conséquent on devrait avoir $\lambda < r$ ce qui correspond à une énergie de l'électron de plusieurs dizaines de MeV. Or l'énergie de liaison d'un proton dans le noyau est de l'ordre de 8 MeV en moyenne; on voit donc mal, comment un tel électron pourrait être retenu dans le noyau.

2) D'après la loi statistique générale, un noyau suit la statistique de Bose-Einstein ou celle de Fermi-Dirac suivant que son nombre de masse est pair ou impair. D'autre part, d'après le théorème d'Ehrenfest-Oppenheimer, les noyaux à spin entier suivent la statistique de Bose-Einstein, ceux à spin demi-entier la statistique de Fermi-Dirac. Il en résulte que si les constituants du noyau (proton et électron) ont un spin $1/2$, le spin du noyau lui-même doit être entier ou demi-entier suivant que le nombre de ses constituants est pair ou impair. Or le nombre total des constituants d'un noyau de charge Z et de masse M , contenant n_p protons et n_e électrons, doit être

$$n = n_p + n_e = 2M - Z$$

(car $n_p = M$ et $n_e = M-Z$) et ce nombre n est pair ou impair suivant que Z est lui-même pair ou impair respectivement. Ainsi le noyau ${}^{14}_7\text{N}$ avec $Z = 7$ devrait avoir un spin demi-entier, tandis qu'expérimentalement son spin est nul; d'où contradiction.

3) Les moments magnétiques des noyaux sont de l'ordre de grandeur du petit magnéton de Bohr $\frac{eh}{4\pi mc}$, qui est environ 1840 fois plus petit que le moment magnétique de l'électron, ce qui est en défaveur de la présence d'électrons dans le noyau.

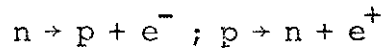
4) Les noyaux radioactifs β ont des vies moyennes allant jusqu'à 10^8 années et émettent des électrons d'une énergie de l'ordre de 1 MeV ; pour que ces électrons puissent être retenus dans le noyau pendant des temps aussi longs, il faudrait qu'une force quelconque les empêche d'en sortir; or aucun potentiel ne pouvait constituer une barrière satisfaisant à ces conditions.

L'hypothèse de l'existence d'électrons dans le noyau devait donc être tôt ou tard abandonnée. On supposait alors que les électrons de la radioactivité β étaient créés au moment même de leur émission. Il faut rappeler ici que la radioactivité artificielle n'étant pas encore découverte, la question de l'émission de positrons ne se posait évidemment pas.

La découverte du neutron venait donc bien à temps pour résoudre toutes ces difficultés.

En effet aussitôt après la parution de la publication de Chadwick sur l'existence du neutron, W. Heisenberg dans une série de trois articles se suivant à six mois d'intervalle ⁽⁸⁷⁾ propose une nouvelle théorie du noyau à base de protons et de neutrons uniquement. Somme toute le proton et le neutron sont considérés comme deux états différents d'une même particule, qui recevra le nom de nucléon,* pouvant se différencier par un nouveau nombre quantique, le spin isotopique ou isospin (matrice ρ

de Heisenberg), le passage d'un état à l'autre s'accompagnant de l'émission d'un électron positif ou négatif :



Du coup toutes les difficultés de la présence d'électrons intra-nucléaires se trouvent écartées et un parallélisme est établi entre l'émission des photons et d'électrons ou de positrons par les noyaux (Fermi), dont la stabilité est assurée par une énergie d'échange entre le proton et le neutron, la répulsion coulombienne étant pratiquement négligeable. Heisenberg postule dès le début que le spin du neutron est $1/2^*$, hypothèse nécessaire pour expliquer le spin et la parité du noyau ${}^{14}_7\text{N}$, mais le neutron n'est pas considéré comme une particule composée d'un proton et d'un électron, ce qui conduirait à considérer l'électron comme un boson de spin 0. "Il ne semble pas nécessaire d'approfondir plus loin une telle image" dit Heisenberg. Cette force d'échange neutron-proton n'étant pas capable à elle seule de rendre compte de la grande stabilité de la particule α , beaucoup plus stable que le deuton, Majorana introduit une interaction supplémentaire due à l'échange de spin et indépendante du spin des nucléons en interaction ⁽⁸⁸⁾. Ainsi dans une interaction du type Heisenberg le proton échange ses

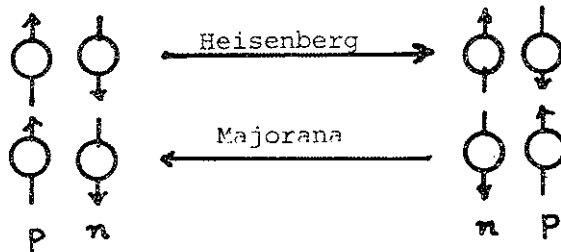


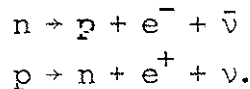
Fig.7

coordonnées (position) et son spin avec le neutron et vice-versa, tandis que dans une interaction du type Majorana il y a échange des coordonnées seulement, mais pas des spins.

Cela étant, il est vite apparu (BETHE, 1936) ⁽⁸⁹⁾ qu'il était aussi nécessaire de prendre en considération des interactions du type (pp) et (nn), probablement égales entre elles, dont l'existence a été établie expérimenta-

lement par la diffusion ($\pi\pi$). L'hypothèse de l'égalité rigoureuse entre les interactions ($\pi\pi$) et (nn) est l'hypothèse de l'indépendance par rapport à la charge. Une telle interaction sans échange de charge, ni de spin est du type Wigner ; elle est du type Bartlett si elle a lieu avec échange du spin seul.

Or, après la formulation de la théorie de Heisenberg, Fermi (1901-1954) ⁽⁹⁰⁾, par analogie avec la théorie électromagnétique, avait proposé une théorie de la désintégration β , suivant laquelle l'interaction avait lieu avec émission de deux particules, un électron et un neutrino. Cette dernière particule (ainsi que son anti-particule) de nature purement hypothétique avait été postulée en 1930 par W. Pauli (1900-1958) afin d'assurer la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement dans la désintégration β (ainsi que la conservation du spin) ; elle devait avoir une charge nulle, un spin 1/2 et une masse probablement nulle. On peut donc décrire la radioactivité β^\pm par les transformations :



En reprenant cette idée, le physicien japonais H. Yukawa ⁽⁹¹⁾ développe en 1935 une théorie du champ nucléaire, dont les quanta sont des particules de spin nul, mais douées d'une masse intermédiaire entre celle de l'électron et celle du proton. De ces quanta lourds nommés mésons ou mésotons, Yukawa a estimé la masse en supposant un potentiel de la forme :

$$V = g \frac{e^{-r/a}}{r}$$

dont la portée $a = \frac{h}{2\pi\mu_0 c}$ donne $\mu \sim 200m_e$ pour la masse du quantum lourd.

Ces mésons positifs ou négatifs pouvaient rendre compte de l'interaction (np) par l'intermédiaire d'un processus virtuel :

$$N = N' + \pi^\pm \quad (\text{couplage de Yukawa})$$

où π^\pm est le quantum de Yukawa. On postula par la suite l'existence d'un π^0 ,

de charge nulle, responsable de l'interaction (pp) et (nn) (fig. 8) :

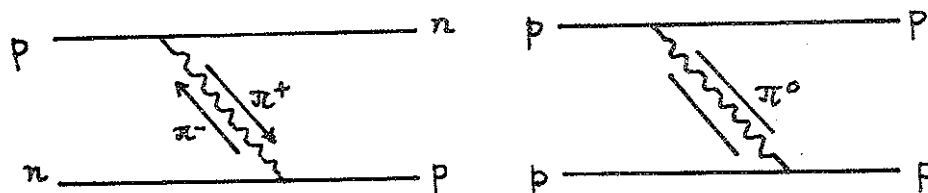


Fig.8

L'existence d'un tel processus virtuel, s'effectuant sans conservation de l'énergie, rendait bien compte du fait que ces mésons n'étaient pas observés lors des réactions nucléaires, qui mettent en jeu des énergies faibles par rapport à la masse des mésons échangés ; du point de vue théorique il n'y avait là aucune difficulté. Bien plus, la fameuse "équation fondamentale" d'Eddington (1882)1944) :

$$10m^2 - 136 m.m' + m'^2 = 0$$

prévoyait une particule "fictive" de masse $m' = 135,9 m_e$.

Par contre, du point de vue expérimental, la situation était très inconfortable, du fait que les énergies disponibles (particules α , petits accélérateurs du type Cockroft-Walter, Van de Graaff, cyclotrons) étaient bien insuffisantes pour produire des mésons et étudier leurs propriétés. Par un juste retour des choses, la théorie marquait le pas devant l'expérience réduite à l'impuissance et l'ajustement théorique des données expérimentales sur la diffusion p-p conduisait à une masse de méson neutre d'environ $330m_e$.

VIII - 9 LE NEUTRINO

A ce stade il est nécessaire de faire encore un petit retour en arrière (1930) afin de poursuivre l'étrange histoire d'une autre particule, qui est actuellement au centre des préoccupations des physiciens. Rappelons tout d'abord que le neutron n'était pas encore découvert, mais des difficultés très graves surgissaient dans le domaine de la radioactivité β naturel-

le, dont l'étude était poursuivie activement dans tous les laboratoires.

Les difficultés de spin et de statistique mises à part, l'étude des spectres des électrons de radioactivité β en faisait surgir une autre beaucoup plus grave. On savait en effet que ces électrons étaient loin d'être monocinétiques*; bien au contraire leurs vitesses (ou leurs énergies) sont distribuées suivant tout un spectre allant de zéro jusqu'à une valeur maxima. Si donc l'énergie n'était pas conservée pendant la désintégration, on pouvait penser (et Bethe et Bacher en ont fait le calcul) qu'il serait possible de construire un mécanisme à mouvement perpétuel ⁽⁹²⁾.

Fallait-il abandonner le principe, si cher à tous, de la conservation de l'énergie dans les processus élémentaires? Beaucoup de physiciens, y compris Bohr et Rutherford, le pensaient, mais il était difficile de s'y résoudre; on essaya alors de "noyer le poisson" par une conservation statistique de l'énergie, mais cette idée salvatrice ne satisfaisait personne. Fallait-il supposer que l'électron n'était pas l'unique particule émise pendant la désintégration, mais qu'il était accompagné d'une autre (de nature inconnue) qui emportait le reste de l'énergie? *

A un certain moment on pensa que les choses pourraient bien s'arranger, si, pendant la désintégration, il n'y avait pas émission d'un seul électron, mais de deux. L'idée était séduisante, mais l'expérience l'a vite condamnée ⁽⁹³⁾, Gurney ayant montré que le nombre des particules émises par désintégration était de $1,06 + 0,06$! De nombreuses autres possibilités furent considérées ⁽⁹⁴⁾, mais aucune n'a pu résister aux tests expérimentaux. Les mesures calorimétriques de l'énergie dégagée par désintégration du RaE donnaient une valeur de 0,34 MeV par désintégration, tandis que l'énergie maxima du spectre était de 1,05 MeV ⁽⁹⁵⁾.

En passant sous silence les nombreuses autres hypothèses proposées, "pour sauver les phénomènes", au milieu de toutes ces difficultés, W. Pauli, retenu à Zurich, lance par lettre aux physiciens réunis à Tübingen la bombe neutrino en ces termes :

...quant à la mauvaise statistique des noyaux de N et Li et le spectre β continu, j'ai songé à un remède désespéré pour sauver les lois de la conservation de l'énergie et de la statistique.

Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin $1/2$, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder $0,01$ de la masse du proton. Le spectre β serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration β avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et l'électron est constante...

J'admets que mon remède peut paraître invraisemblable, car on aurait du voir ces neutrons bien plus tôt, si réellement ils existaient. Mais seul qui parie gagne et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre β , est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, M. Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : oh, il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme avec les nouveaux impôts. On doit donc discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement... (96)

L'année suivante (1931) au Congrès de Cal. Tech. (puis à Rome, à la Conférence Internationale sur les particules Élémentaires et la Physique Nucléaire (déjà ?), dont Fermi était le secrétaire, Pauli défend son "neutron" devant les physiciens sceptiques. Même situation au Congrès Solvay en 1933 (mais le neutron était déjà découvert), où Bohr s'étonne que dans les processus nucléaires la charge électrique se conserve toujours, mais l'énergie ne semble pas se conserver, et il se demande comment s'en sortir "sans que l'édifice de la physique théorique moderne s'écroule". Pauli y défend toujours son "neutron", mais entre temps dans quelques esprits (Fermi, F. Perrin) l'idée avait déjà fait du chemin et Fermi avait trouvé un nouveau nom, neutrino (= petit neutron) pour la nouvelle particule, qui a prévalu à celui d'ergon de F. Perrin.

Fermi réfléchissait déjà sur la possibilité de mise en évidence expérimentale du "petit neutron" et F. Perrin, par un calcul approximatif ⁽⁹⁷⁾ montrait que la masse de cette particule pouvait effectivement être nulle. Mais Fermi va vite. A la fin de l'année 1933 il publie un premier article ⁽⁹⁸⁾, puis formule sa célèbre théorie de la radioactivité β ⁽⁹⁹⁾, construite par analogie avec l'électromagnétisme et qui, à quelques retouches mineures près, constitue encore aujourd'hui la base de la théorie des interactions faibles.

Mais le neutrino est très difficile à mettre en évidence expérimentalement, tout d'abord en raison de sa neutralité électrique et ensuite, et surtout, à cause de sa faible masse, qui fait que, même dans les cas les plus favorables, il ne peut communiquer au noyau résiduel (dont on pouvait espérer détecter le recul) qu'une énergie trop faible. Cette énergie n'est que de quelques MeV, et la vitesse acquise par le noyau est beaucoup trop faible pour le déplacer d'une quantité visible (de l'ordre du millimètre) même dans une chambre Wilson à pression réduite.

Fermi raisonne alors autrement :

La désintégration β peut être décrite par un processus du type :



où la flèche vers la droite correspond à la capture K et celle vers la gauche à la radioactivité β du neutron. Le problème central de la radioactivité est alors de calculer la probabilité de transition dans un sens ou dans l'autre ; ce calcul nécessite l'introduction d'une force nouvelle (la force de Fermi), capable de transformer un neutron en proton et vice-versa. Par analogie avec l'électromagnétisme cette transition est induite par une sorte de rayonnement électron-neutrino, dont l'intensité est proportionnelle à une espèce de densité nucléonique de charge faible.*

Moyennant certaines approximations Fermi calcule alors la probabilité de transition et détermine la forme du spectre dont la partie supé-

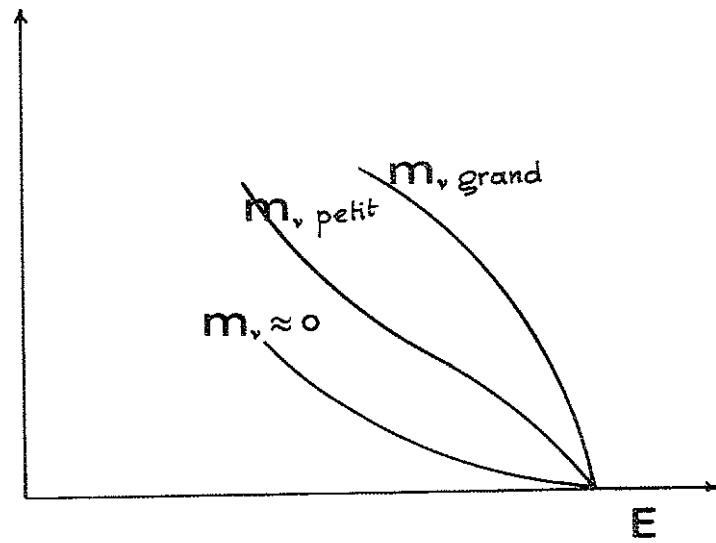


Fig. 9 Spectres théoriques des électrons de la radioactivité suivant la valeur de la masse du neutrino (Fermi).

rieure dépend d'une façon critique de la masse du neutrino (fig. 9)^{*} ; la comparaison avec les spectres expérimentaux montre que cette masse doit être très faible devant celle de l'électron, peut-être même nulle. En conclusion, dit Fermi : si, par une comparaison plus précise de l'expérience avec la théorie, on arrivait à des contradictions, il serait facile de modifier la théorie sans toucher à ces notions fondamentales.... La nécessité d'une telle modification ne peut se manifester que par un développement ultérieur de la théorie et peut-être aussi par un raffinement des données expérimentales.

Or, si, comme le remarque Bethe⁽¹⁰⁰⁾, le neutrino est un fermion, il découle de la théorie de Dirac qu'il doit exister un antineutrino, mais pour le moment "il n'y a pas besoin de distinguer entre un neutrino et un antineutrino, sauf en ce qui concerne le formalisme mathématique". Ce n'est au fond qu'un "truc" de calcul.

Aussitôt après la formulation de la théorie de Fermi, Heisenberg suggéra qu'il pouvait bien y avoir entre la force de Fermi et la force nucléaire une relation, mais le calcul⁽¹⁰¹⁾ conduisait à une portée de cette force beaucoup trop courte (10^{-15} cm) et pour des distances de l'ordre de la portée des forces nucléaires (10^{-13} cm) cette interaction était trop faible d'un facteur 10^{12} .

Plusieurs tentatives pour concilier la théorie avec les résultats expérimentaux ont échoué et finalement cet aspect de la théorie a été abandonné.

Quant au neutrino lui-même il ne sera, pendant longtemps encore, qu'une particule ayant une existence purement théorique, et ce n'est que pendant la période d'après guerre que des recherches sérieuses seront entreprises pour essayer de le mettre en évidence.

Pendant cette même période la théorie de Fermi sera elle aussi complétée, afin de tenir compte des nécessités théoriques, et expérimentales nouvelles (conservation ou non de la parité), dont nous rendrons compte dans la deuxième partie de ce travail.

VIII - 10 LE RAYONNEMENT COSMIQUE ET LA RECHERCHE DES MESOTONS.

Le rayonnement cosmique a joué dans la découverte et l'étude des particules élémentaires un rôle trop important pour ne pas consacrer quelques lignes à un survol rapide de ce mystérieux rayonnement, découvert au tout début de ce siècle, et dont l'étude patiente et systématique a donné lieu à toute une cascade de découvertes, qui auraient été impossibles par une autre voie.*

Cette étude commence pratiquement avec la découverte des phénomènes de la radioactivité naturelle et a été déclenchée grâce à un phénomène très banal, qui a tout de même intrigué quelques physiciens : les appareils de mesure les plus sensibles accusaient des courants de fuite (décharge lente mais spontanée des électroscopes etc...) attribués au début à de mauvais isollements ou une faible conductivité électrique de l'air, une radioactivité spontanée de la terre etc. Ce phénomène gênant pour les mesures a été étudié par Elster et Geitel⁽¹⁰²⁾ d'une part et par C.T.R. Wilson⁽¹⁰³⁾ d'autre part, qui ont vite constaté que des ions sont continuellement formés dans les appareils, même après leur élimination par un champ électrique.** En présumant que la radioactivité du sol en était la cause, des études ont été entreprises à des altitudes variables dans l'atmosphère et, après plusieurs ascensions en ballon, Gockel a constaté que cette ionisation gênante décroissait effectivement en altitude, mais très lentement⁽¹⁰⁴⁾. Hess et Kolhörster⁽¹⁰⁵⁾ ont même trouvé qu'après un petit affaiblissement l'ionisation augmentait de nouveau avec l'altitude pour atteindre à 9000 mètres une valeur 9 fois plus grande qu'à la surface de la terre.

C'est alors que Hess a émis l'hypothèse qu'un rayonnement pénétrant venait de l'espace extérieur. Ce rayonnement dont l'origine reste encore en grande partie inconnue a reçu le nom de Rayonnement Cosmique, à cause de son origine présumée et vague. Son étude a été poursuivie activement dans les différents pays par deux générations de physiciens et il ne peut être question de résumer ici les nombreux et importants résultats obtenus; cette étude est d'ailleurs toujours poursuivie à cause des éner-

gies extraordinairement grandes que l'on y rencontre, à une cadence malheureusement trop faible.

Avec le développement des techniques il a alors été possible d'observer (pour la première fois par hasard) des traces des particules individuelles, dont l'énergie était estimée à plusieurs MeV, dans la chambre de Wilson. Il y en avait environ 1,2 particules par cm^2 et par minute.

A partir de ce moment les physiciens redoublent d'ingéniosité et ils inventent de nombreux dispositifs pour l'étude de cet étrange rayonnement (compteurs, coïncidences, chambres autodéclenchées).

Nous avons déjà vu comment C.D. Anderson y a découvert l'électron positif, première découverte d'une portée encore insoupçonnée dans le rayonnement cosmique. Personne ne pouvait se douter en ce moment des larges possibilités que ce rayonnement allait ouvrir aux physiciens des particules.

La formulation par H. Yukawa de la nouvelle théorie des forces nucléaires (1935) agissant par l'intermédiaire d'un quantum lourd a certainement beaucoup stimulé ce genre de recherches, car s'il y avait un espoir de trouver la particule de Yukawa, c'était bien dans le rayonnement cosmique*.

Ces particules (dans le cas où il y en aurait plusieurs) ont reçu de la part des expérimentateurs le nom de mésotrons, tandis que le nom méson était réservé aux spéculations théoriques**.

Dans cette recherche une première alerte aurait pu être déclenchée dès 1931, époque à laquelle Kuntze⁽¹⁰⁶⁾ avait obtenu un cliché (d'une assez mauvaise qualité, il faut le dire) montrant la trajectoire d'une particule du rayonnement cosmique, courbée par un champ magnétique et dont l'ionisation était difficilement compatible avec celle d'un électron. A regarder de plus près on pouvait même suspecter que cette parti-

cule s'arrêtait dans la chambre et s'y désintégrait en une autre beaucoup plus faiblement ionisante, qui pourrait très bien être un électron. Malheureusement cette photographie, venue trop tôt, n'a pas suffisamment attiré l'attention des physiciens et a été vite oubliée. En la regardant aujourd'hui, on a bien l'impression que les physiciens ont bien voulu fermer leurs yeux devant un événement remarquablement rare à l'époque.

Une nouvelle indication en faveur de l'existence éventuelle de particules de masse intermédiaire entre celles de l'électron et du proton (mésotrons) a été apportée par S. Neddermeyer et C.D. Anderson⁽¹⁰⁷⁾, qui étudiaient depuis 1933 la perte d'énergie des particules cosmiques traversant des épaisseurs variables de Plomb. Dès leurs premières mesures il semblait bien que de telles particules étaient effectivement présentes⁽¹⁰⁸⁾. Forts de ces indications ils ont alors modifié leur appareil, en plaçant un compteur à l'intérieur de leur chambre, en coïncidence avec un compteur extérieur.

Dans un cliché remarquable ils observèrent alors une particule de charge positive qui, pénétrant par le bas de la chambre, traversait le compteur intérieur et émergeait avec une énergie assez faible pour s'arrêter après avoir parcouru un centimètre d'air équivalent dans le gaz de la chambre. Plusieurs déterminations indépendantes de la masse de la particule correspondante montraient qu'elle était d'environ 120-400 plus lourde que la masse de l'électron. Ces résultats furent aussitôt confirmés par Street et Stevenson⁽¹⁰⁹⁾, puis par Brode et ses collaborateurs⁽¹¹⁰⁾, qui obtenaient pour la masse du mésoton environ $250 m_e$, tandis que L. Leprince-Ringuet et collaborateurs⁽¹¹¹⁾ obtenaient l'année suivante (1939), en chambre de Wilson, un cliché permettant une détermination plus précise de la masse $(240 \pm 30) m_e$, grâce à un choc élastique bien mesurable d'un mésoton sur un électron. En 1940 enfin, Williams et Roberts⁽¹¹²⁾, dans un cliché resté célèbre, observèrent une particule cosmique positive de masse $(180 - 320) m_e$, s'arrêtant dans la chambre et se désintégrant en un électron de ~ 70 MeV et une particule neutre (pour conserver la quantité de mouvement) ; le temps d'arrêt de la particule était de l'ordre de la milliseconde.

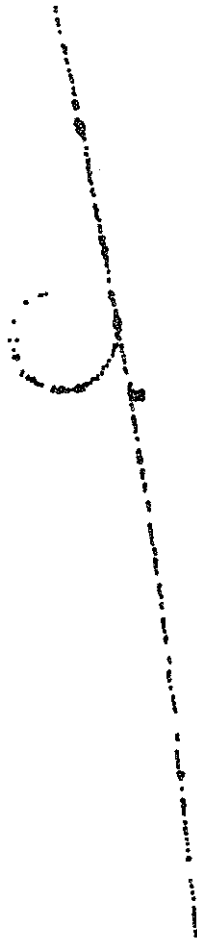


Fig.10 Choc d'un mésotron contre un électron permettant une estimation de la masse du Mésotron (schématique).
(L.Leprince-Ringuet)

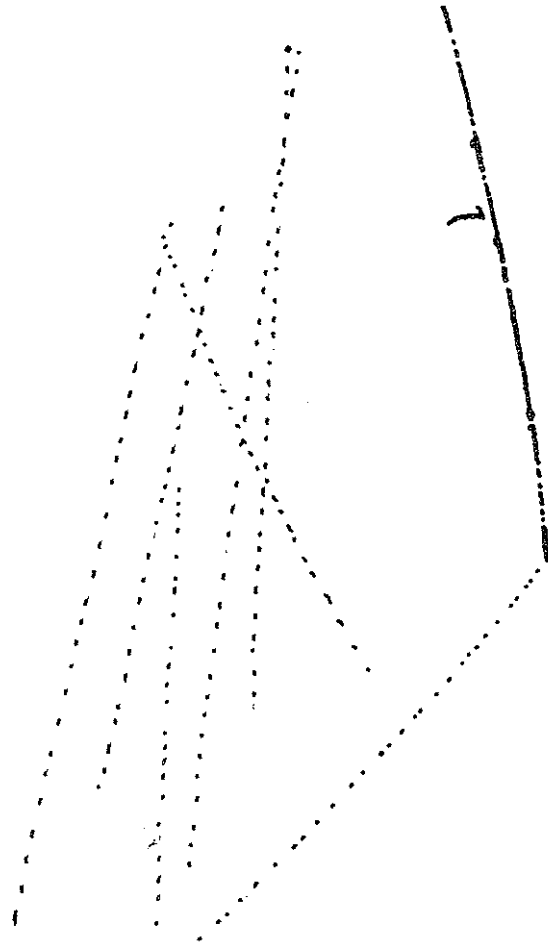


Fig. 11 Reproduction schématique du cliché de Williams et Roberts montrant la désintégration d'un méson positif de masse $(250 \pm 70)m_e$.

Tout semblait donc cadrer parfaitement avec la théorie de Yukawa; le présumé méson n'avait pas seulement une masse voisine de celle prévue; il était de plus instable et se désintégraît, comme des mesures plus précises l'ont montré, avec une vie moyenne de l'ordre de 10^{-6} s. C'était se réjouir trop tôt, car il s'est avéré que les choses étaient loin d'être aussi simples. A ce stade la deuxième guerre mondiale vint interrompre toute recherche dans ce domaine et la situation restera incertaine et confuse jusqu'à 1947.

Ainsi, jusqu'à cette époque, on connaît un certain nombre de particules, dites fondamentales ou élémentaires (électrons + et -, proton, neutron, photon) et on soupçonne fortement l'existence d'autres (neutrino, antineutrino, mésons), mais leur présence effective dans la nature reste à établir. L'attitude des physiciens à cet égard est toute différente, suivant qu'ils appartiennent au clan des expérimentateurs ou à celui des théoriciens. Ainsi Rutherford déclarait au Conseil Solvay 1933 : j'aurais été plus content si la théorie était venue après l'établissement expérimental des faits. C'était à propos du positron, prédit par Dirac peu de temps avant sa découverte. Par contre Dirac, tout en s'inquiétant de cette prolifération de particules dont "the number has shown a rather alarming tendency to increase during recent years", n'hésite pas pour autant d'affirmer que des antiprotons doivent exister dans la nature! (113)

TABLE III.
Particules élémentaires connues avant 1947

Particule	symbole	Masse (MeV)	Charge	Spin
Photon	ν	0	0	1
Electron	e^-	0,511	-1	1/2
Positron	e^+	0,511	+1	1/2
Neutrino	ν	0?	0	1/2
Antineutrino	$\bar{\nu}$	0?	0	1/2
Proton	p	938,2	+1	1/2
Neutron	n	939,5	0	1/2
Mésotons	?	100?	?	?

VIII - 11 LE PROGRES TECHNIQUE

Avant de clore cette première partie sur la physique des particules, il ne serait pas superflu de jeter un coup d'oeil rapide sur les développements techniques pendant cette période qui embrasse toute la première moitié du XXème siècle.

Dans un premier stade (1900-1930) les appareils utilisés par les physiciens sont en règle générale très simples. Ecrans fluorescents, chambres d'ionisation, chambres de Wilson, compteurs.... sont habituellement

construits au laboratoire par les physiciens eux-mêmes, éventuellement aidés par un mécanicien et avec des moyens de fortune. Ils sont peu encombrants et tiennent le plus souvent sur une table aux dimensions modestes; on les modifie facilement selon les exigences du moment. Il ne peut particulièrement pas être question que l'industrie s'occupe de fabriquer des objets peu demandés et ne présentant aucun intérêt pour le marché. Il faut construire son propre compteur Geiger-Müller.

Cette situation a changé assez radicalement autour des années 1930. La première découverte d'une réaction nucléaire par Rutherford (1919) à l'aide des particules alpha du RaC' incite à la recherche de moyens plus efficaces, notamment à la production de particules artificiellement accélérées (principalement des protons) avec des flux plus importants que les sources des radioéléments naturels ne pouvaient fournir. Les premières recherches dans cette voie sont effectuées au Cavendish Laboratory, par J.D. Cockcroft et E.T.S. Walton, qui réussissent à accélérer des protons sous plusieurs centaines de kilovolts, en exploitant une idée de multiplication de voltage proposée par H. Greinacher⁽¹¹⁴⁾. En 1932 les premières réactions nucléaires par protons sont réalisées par cette technique⁽¹¹⁵⁾. Entre temps un nouveau type d'accélérateur est proposé par R.J. Van de Graaff aux Etats-Unis⁽¹¹⁶⁾, tandis que E.O. Lawrence et N.E. Edlefsen lancent l'idée du cyclotron, mis au point par Lawrence et M.S. Livingston⁽¹¹⁸⁾ en 1932.

L'énergie des particules fournies par ces accélérateurs n'est certes pas très grande (elle atteint à peine une dizaine de MeV), mais pour l'époque, elle offre de grandes possibilités aux physiciens, et des centaines de réactions sont étudiées grâce à cette nouvelle technique. On produit même des neutrons dont l'importance en tant que projectile nucléaire est magnifiquement illustrée par les travaux de Fermi et Joliot-Curie et de bien d'autres, Hahn et Strassmann en particulier.

Parallèlement les moyens de détection se perfectionnent à leur tour, tout en restant de dimensions aussi modestes; on construit en parti-

culier de nombreux modèles de chambres de Wilson, que les cosmiciens utilisent à l'envers; il leur faut en effet qu'elle soit verticale et non plus horizontale. Mais tout reste à l'intérieur du laboratoire, à cette différence près que leur fonctionnement commence à exiger une petite équipe spécialisée, car ces appareils de fortune sont souvent capricieux et ne marchent pas toujours, comme on le désirerait. Un petit cyclotron peut être souvent en panne, tantôt du côté haute tension, tantôt du côté alimentation de l'aimant etc.

Ce sont néanmoins ces appareils pour lilliputiens, qui ont été à la base des progrès considérables réalisés en physique nucléaire jusqu'au début de la seconde guerre mondiale. Plusieurs d'entre eux, plus ou moins modifiés, sont encore en service, d'autres sont utilisés comme injecteurs pour alimenter les nouveaux monstres, qui, eux, renferment les laboratoires, s'il y a encore de la place disponible autour d'eux; autrement il faut aller s'installer ailleurs.

Nous ne pouvons nous étendre plus longuement sur ce sujet sur lequel il existe d'excellentes monographies ⁽¹¹⁹⁾.

VIII - 12. LA SITUATION THEORIQUE

Nous avons vu chemin faisant l'éclosion des idées théoriques après la découverte du neutron et la formulation par Heisenberg de la constitution des noyaux à partir de protons et de neutrons, suivie peu après par la théorie de Fermi sur la désintégration β faisant intervenir un champ nouveau électron-neutrino; mais aucune de ces théories n'était capable à elle seule de fournir une explication satisfaisante des forces nucléaires.

C'est devant ce dilemme que la théorie de Yukawa a vu le jour et a imprimé une impulsion nouvelle tant aux recherches théoriques qu'expérimentales, surtout à partir du moment où la particule prévue par Yukawa semblait exister réellement dans la nature.

Dans le premier stade la théorie scalaire supposait un méson chargé (afin de rendre compte de l'interaction p-n de spin nul, mais par la suite toute une variété de théories a vu le jour (neutre, mixte, avec spin 0, 1/2, 1 etc) mais aucune n'a pu subsister longtemps. Comme le note Wentzel dans son article de revue ⁽¹²⁰⁾ jusqu'à 1947 " the balance of such a review is rather embarrassing : none of the theories worked out so far proves to be entirely satisfactory".

L'existence d'un méson neutre (appelé neutretto) était plus que problématique et pourtant nécessaire pour rendre compte de l'indépendance des forces nucléaires par rapport à la charge, fortement suggérée par les expériences de diffusion p-p et p-n.

D'autres difficultés à propos des moments magnétiques et des vies moyennes venaient compliquer singulièrement une situation déjà assez confuse par elle même.

Il est donc inutile de poursuivre plus loin l'énumération de toutes ces théories complètement périmées. Pour plus de détails on peut consulter un récent travail ⁽¹²¹⁾ couvrant la période allant jusqu'à 1952.

DEUXIEME PARTIE

AVANT PROPOS

Cette deuxième partie de notre exposé sur les Particules Élémentaires couvre la courte période allant de la fin de la dernière guerre à nos jours.

Nous avons tenté de rendre compte des prodigieux progrès réalisés dans ce domaine qui finit par constituer une nouvelle branche de la physique, la Physique des Particules, nommée encore Physique des Hautes Energies, née avec la découverte quasi-simultanée des pions et des particules étranges (1947).

Cette tâche se trouve singulièrement compliquée non seulement du fait des découvertes très nombreuses effectuées pendant ce laps de temps, mais aussi, et surtout, à cause de l'état même de nos connaissances qui actuellement est encore assez fluide ou, si l'on veut, insuffisamment cristallisé pour pouvoir tirer des conclusions générales valables.

Les récentes tentatives d'unification de toutes les interactions que l'on rencontre dans la nature (fortes, électromagnétiques et faibles, sans même exclure la gravitation), les découvertes plus récentes encore de particules auparavant insoupçonnées (ψ , χ ...?) ouvrent de larges horizons dont il est difficile de prévoir le cheminement, mais qui conduiront certainement à de nouveaux bouleversements de nos connaissances de la matière et son comportement à des énergies de plus en plus grandes.

Les voies de la Nature sont impénétrables et les particules élémentaires bien opaques. Y-a-t-il des perspectives plus intéressantes pour une science si jeune et si vivante ? "Combattre aux frontières de l'illimité et de l'avenir", selon le poète, n'est-il pas une tâche des plus exaltantes ?

I - INTRODUCTION

*The scientists must become
the prophets and the poets
of our time.*

(C.F. Powell)

Après la seconde guerre mondiale et les bouleversements qu'elle a entraînés, les physiciens européens (ceux qui en sont sortis vivants) se voient obligés de prendre le train en marche pour essayer de rattraper le retard considérable pris sur leurs collègues américains. En partant de zéro, il fallait ouvrir de nouveau leurs laboratoires et s'engager dans une course qui s'annonce inégale et dure, vus les moyens dont ils disposent et les progrès réalisés par les physiciens durant la guerre, principalement aux Etats-Unis. Nous ne nous occuperons ici que des physiciens du rayonnement cosmique et des efforts qu'ils ont déployés afin de mettre cette source à profit pour la recherche interrompue des mésotrons, au point où nous l'avons laissée à la fin de la première partie de ce travail.

De ce rayonnement dont l'étude avait débuté, on s'en souvient, au commencement de ce siècle, on ne connaît en fin de compte que bien peu de choses ; plusieurs physiciens pensaient qu'il comportait des électrons de grande énergie et de provenance inconnue, mais en 1940 Marcel Schein et ses collaborateurs ⁽¹²²⁾ avaient obtenu des résultats permettant de penser qu'il s'agissait de protons plutôt que d'électrons. Les nombreuses études entreprises depuis 1945 ont vite démontré l'extrême complexité de ce rayonnement dont on ignore encore l'origine, mais dont on connaît assez bien la composition :

à côté des protons qui en constituent la majeure partie, on a pu y découvrir des neutrons, des particules alpha, des photons, puis toute une gamme de noyaux lourds complètement ionisés et à une abondance pratiquement égale à celle que l'on connaît sur la terre. (123-128)

Ce sera ce rayonnement qui pendant plusieurs années et jusqu'à la mise en opération des nouveaux accélérateurs de particules, fera l'objet principal des études des cosmiciens à la recherche des mésotrons ; il constituait en ce moment l'unique source disponible d'énergie suffisamment grande pour ces recherches. Nous verrons que malgré la modestie des moyens et la cadence aléatoire et extrêmement faible d'arrivée des particules cosmiques à la surface de la terre, ce rayonnement a été une mine inépuisable en particules nouvelles, dont l'existence n'avait même pas été soupçonnée auparavant.

Les nouvelles recherches effectuées simultanément dans plusieurs laboratoires ont d'abord pleinement confirmé les faits constatés avant la guerre, à savoir qu'il existait certainement dans le rayonnement cosmique des particules lourdes (environ 200 fois plus lourdes que les électrons) aussi bien positives que négatives et en nombres approximativement égaux. Ainsi Fretter⁽¹²⁹⁾ trouve dans 26 cas une masse de $(202 \pm 5) m_e$ et une charge électrique $(1,00 \pm 0,02)e$ ⁽¹³⁰⁾ ; d'autres déterminations donnent une masse de $(218 \pm 5)m_e$ sur 18 événements⁽¹³¹⁾, ou bien $(196 \pm 3)m_e$ ⁽¹³²⁾ etc.

Comme Bethe l'a fait remarquer en 1946, "toutes les données existantes sont compatibles avec une masse unique du méson, d'environ 200 fois la masse de l'électron"⁽¹³³⁾.

Quant au spin du dit méson, il est tout aussi bien compatible avec la valeur 0 qu'avec 1 ou $1/2$ ^(134,135).

Du côté théorique, pour rendre compte de la radiativité β , le physicien japonais H. Yukawa avait postulé depuis longtemps que le méson devait se désintégrer en donnant un électron, tandis que d'autres théoriciens⁽¹³⁶⁾ pensaient que tel devrait être effectivement le cas pour le méson positif, mais le méson négatif devrait plutôt s'absorber par la matière. Les expériences par contre semblaient montrer que l'intensité des différentes

composantes du rayonnement cosmique était à peu près la même dans l'air, indépendamment du signe, mais sensiblement différente, à masse superficielle égale, dans les milieux solides. Tout incitait donc à penser que le temps de parcours des mésons dans l'air était du même ordre de grandeur que leur vie moyenne, de sorte que la plupart d'entre eux s'y désintégraient, tandis que dans le cas des solides, seuls les mésons non absorbés pouvaient les traverser.

Devant cette situation Sakata et Inoue ⁽¹³⁷⁾ suggèrent en 1943 que le méson cosmique ne pouvait pas être considéré comme identique à la particule postulée par Yukawa, c'est-à-dire à la particule responsable des forces nucléaires, mais une particule élémentaire qui a une relation étroite avec celle de Yukawa, mais doit être considérée comme une particule élémentaire d'une espèce différente. Malheureusement, à cause des difficultés de la guerre, cette publication n'avait pas atteint à temps voulu ni l'Europe, ni les Etats-Unis ; elle n'a donc pratiquement pas exercé d'influence sur le développement des idées théoriques ou sur la conduite des expériences.

Afin d'essayer de comprendre le comportement des mésotrons (positifs et négatifs) traversant la matière, une expérience, restée célèbre, avait été entreprise en 1945 ^(138,139) : les mésotrons des deux signes traversaient des barres de fer magnétisé et, par inversion du courant, étaient déviés en sens contraire, puis absorbés dans la matière et finalement détectés par l'électron(?) de leur désintégration, grâce à un dispositif à coïncidences différées de 1 à 4 μ s. En opérant avec des matériaux d'absorption de densité différente (carbone et fer), les auteurs ont pu montrer que dans le fer tous les mésons positifs se désintégraient, tandis que les négatifs étaient absorbés. Ils en conclurent que, contrairement aux idées de Yukawa, les mésons positifs n'entrent pas fortement en interaction avec la matière et que le comportement des mésons négatifs dépend du nombre atomique Z du milieu absorbant : pour des Z faibles la plupart d'entre eux se désintègrent, tandis que pour des valeurs élevées de Z, c'est l'absorption qui est le phénomène dominant.

II.1- LA PARTICULE DE YUKAWA

Entre temps, à Noël 1946, G.P.S. Occhialini qui se trouvait à

Bristol, emporte deux douzaines d'émulsions photographiques spéciales (50 μ d'épaisseur) sur le laboratoire du Pic du Midi de Bigorre (France, 2867m d'altitude) pour les exposer au rayonnement cosmique, plus intense à cette altitude. En effet 10 ans auparavant Blau et Wambacher⁽¹⁴⁰⁾ avaient montré que l'émulsion photographique est capable d'enregistrer les traces des particules ionisantes individuelles qui la traversent, fait signalé depuis 1910 pour les particules alpha⁽¹⁴¹⁾. Il se trouvait aussi que C.F. Powell avait employé cette méthode en physique nucléaire depuis 1939 et en possédait une bonne expérience ; c'est sous son impulsion et en collaboration étroite avec les physiciens de Bristol que l'industrie privée (Ilford Id) avait fabriqué ces nouvelles émulsions qui contenaient environ 10 fois plus de bromure d'Argent que les émulsions ordinaires.

Voici comment C.F. Powell a raconté cette histoire une fois les émulsions récupérées, développées et examinées sous le microscope :

At the beginning, the observers when they found any "event" in their search, such as a disintegration, would call a physicist to scrutinise it to see if it showed any remarkable features. Almost immediately Peter Fowler who was in his final years as an undergraduate at that time, was shown an event in which associated with a small disintegration, there appeared to be a particle, a meson of mass about 200 m_e , which had reached the end of its range at the point where a disintegration occurred. There were only two possible explanations of the observed tracks. Either the particle had come to rest at a point which, by chance, coincided with that of a completely independent disintegration; or the tracks were related in which case the sequence of events was unambiguous. The particle of relatively small mass, the meson, must have reached the end of its range and produced a nuclear disintegration, when it was at, or almost at, "rest", with little or no energy of action.

Just at this time D. Perkins, at the Imperial College in London, who had independently been making similar experiments with the new emulsions, found an "event" with closely similar characteristics. The observation of two "events" of a similar nature seemed to exclude completely the possibility of a chance juxtaposition of unrelated tracks and it appeared certain that we were observing the consequences of the

capture of a negative meson by a nucleus of an atom in the emulsion, and its resulting disintegration. Such a process had been visualised to account for observations on the decay of the positive and negative muons, present as the penetrating component of cosmic radiation, when they are arrested in idfferent materials. Counter experiments had shown that the positive muons always decay into an electron, irrespective of the material by which they are slowed down and brought to rest. On the other hand, whilst negatively charged muons stopped in materials of low atomic weight like carbon are observed to decay with the emission of an electron, when arrested in heavy elements like lead, the decay electron is commonly not observed. It was therefore believed that the nuclei of heavier elements commonly capture a negative muon before it has an appreciable chance to decay and are thereby disintegrated. It was therefore reasonable, at that time, to attribute the disintegrations observed in emulsions by slow particles at the end of their range, to the capture of muons by silver or bromine nuclei, a conclusion which was later called into question.

The observers soon learned to recognise the tracks of mesons and we found many examples of similar disintegrations produced at the end of their range. Indeed the interest and liveliness of the observers was a crucial element in the progress of the work. They learned to distinguish by inspection the tracks of stopping mesons, of mass about two hundred times that of the electron from those of protons and α -particles, for there are characteristic differences between them which an experienced observer soon recognises. And we took a good deal of trouble to help them to learn to interpret the events they found and to understand the significance of what they were doing.

Very soon after the observation of disintegrations produced by slow mesons, which gave a dramatic demonstration of the transformation of mass into energy since the whole mass of the meson disappears and no kinetic energy contributes to the disintegration, an observer directed my attention to an "event" which puzzled her. It appeared that a meson had come to rest, and from the point where it had stopped, a second meson had emerged. This second meson had passed out of the emulsion before stopping, but it was only moving slowly when it escaped from

observation, and its true range can have been only a little greater than the observed length of track.

This observation greatly excited us. Again there was the possibility of a chance juxtaposition of unrelated tracks, but the small number of slow mesons recorded in our plates made the probability of two meson tracks being so precisely associated exceedingly remote. Further, we had not, at that time, found a single example of a meson whose track appeared to originate in the emulsion.

But this observation allowed us to discuss the kind of similar event for which the observers ought to keep a close look-out, and a day later a second example was found which seemed precisely similar in significance to the first, but with the advantage that the secondary meson, diverging from the end of the range of its parent, was this time arrested in the emulsion so that its precise range could be determined. We were immediately struck to find that the two secondary mesons appeared to be ejected with equal, or closely similar, velocities.

At this stage we had the advantage of having worked on homogeneous groups of particles from the artificial disintegration of the light elements and had thus established a range-energy relation for protons. The faster a particle, the further it goes before being arrested in a given medium. If for particles of a given mass and charge the relation between velocity and mean range is known, or that between energy and mean-range, a similar relation for other particles of the same charge but of different mass may readily be computed. Assuming the secondary particles from these two events were of mass about $200 m_e$, the energy with which they were ejected could therefore be estimated from their range. Their observed range of about 400 microns, 0,4 mm, then indicated that they were emitted with an energy of about 4 MeV.

This second event gave us great confidence that we were dealing with an important phenomenon and not a chance juxtaposition of unrelated tracks. If the chance of one such association was small, the chance of finding two representing closely similar phenomena was entirely remote. But what kind of process was involved? It seemed certain that a meson

had reached the end of its range and that a second meson had been ejected from the point of arrest. But how long the first meson rested at the end of its range before the secondary was ejected was entirely uncertain, and although there were indications that the secondary emerged with a definite energy such a view at this stage could not be asserted.

The most obvious explanation of the process was that the primary meson was more massive than the secondary ; that those we were observing were positively charged and that on reaching the end of their range they transformed spontaneously into secondaries of the same charge, the kinetic energy being provided by the equivalent mass which disappeared in the process. It then followed from the principles of conservation of momentum and energy, that if the secondary meson was indeed always being ejected with the same energy, only a single neutral particle was recoiling from it at the instant of decay of which the track would, of course, remain unobserved.

Under these assumptions, if the secondary mesons were identified as the penetrating particles of the cosmic radiation, whose mass was known to be about $200 m_e$, and if the neutral particle was a neutrino or a γ -ray of zero-rest mass, then it was easy to show from the conservation laws that the mass of the primary must be about $265 m_e$. These tentative conclusions were later substantiated and illustrate the power of method to permit farreaching conclusions on the basis of a single, or of a very few observations. But at the time there were other possible explanations which had to be considered.

In particular, Charles Frank in Bristol examined the possibility that the phenomenon was produced in an entirely different way : that the primary meson was negatively charged ; that when arrested it was captured by one of the nuclei in the emulsion with which it interacted. As a results the nuclear charge was reduced by two units, a positive meson with the same mass as the first subsequently emerging with 4 MeV of kinetic energy, which was provided by the change in the mass of the capturing nucleus associated with its transformation. Frank showed that no isotope of the common elements in the emulsion could provide a consistent explanation on the basis of such assumptions.

But it was clearly crucial to find more examples of the process, so that the constant velocity of ejection of the secondaries could be established and so that favourable examples of flat tracks could be found which would permit estimates of the masses of both the primary and the secondary mesons to be made by the rough methods which were then available. So the search for further examples was pressed with great vigour and enthusiasm.

With eight or ten observers searching the plates, it was six or eight weeks before we found any more ; then, once again, two appeared in quick succession, and in a month or two more we increased the number to ten. The new events confirmed that the secondary mesons do indeed commonly appear with kinetic energies constant within a narrow range, and we were confident we were involved with two different particles with masses of the order of 200 and 260 electron-masses, respectively.

Our early reports on these results were received with a certain very proper reserve by other physicists. The early deficiencies were remembered and there was hesitation in giving credence to such important conclusions on the basis of a method with which most physicists had no experience. Further our findings were supported by mosaics of micro-photographs, for as a track wanders at changing depths in the emulsion it passes out of focus ; a succession of overlapping photographs must be taken with appropriate settings in order to obtain enough to construct a mosaic which gives a picture of the whole event at high resolution. In this situation a lecture I gave in Copenhagen in the early spring of 1947 was of particular importance.

With then or twelve secondary meson tracks measured, it was possible to begin to plot the distribution in the values of their range and the evidence that they represent a group homogeneous in velocity. A group of particles of precisely the same initial speed when allowed to enter a given medium, do not all have precisely the same length of path before being brought to rest. There is a variation in their ranges owing to the fact that they lose energy in hundreds of thousands of encounters with individual atoms sometimes losing more sometimes less energy in the different collisions. The resultant final range is therefore a statistical process and the variation in range is referred to as the

"stragglings" of the particles. This process had many years before been studied by Niels Bohr and he and Ø. Bohr had computed the expected "stragglings" as a general problem so that they were in a position to predict the spread in range to be expected by a homogeneous group of muons of energy 4 MeV.

There had been previous speculations by theoreticians, that there were two kinds of mesons in nature notably by Sakata in 1944 and later by Marshak in 1947 * but we had known nothing of them. These speculations were based upon what seemed an irresolvable contradiction in the behaviour of the cosmic ray mesons which we now call muons . The muons constitute the penetrating component of the cosmic radiation and have a mean lifetime of about 2 micro-seconds. They were believed to be created in the high atmosphere when the incoming protons which form the greater part of primary flux of the cosmic rays approaching the earth from out of space, collide with the nuclei of the atoms of the air. The fact that the mesons are copiously produced in such interactions implied that they have a very strong interaction with nuclei, that they are strongly interacting particles to use the modern idiom on the other hand, we have seen that previous experiments had shown that, those negatively charged when they are captured by light elements such as carbon decay with mean lifetimes approximately equal to the value found when the particles are free. It was realised that this implied that they are captured into states of low energy round the capturing nuclei, where they spend an appreciable fraction of their time in the nucleus itself, but nevertheless commonly fail to interact with it. Such a behaviour is impossible for a strongly interacting particle which should interact in a time of the order of the character nuclear time ; viz : about 10^{-23} sec.

These difficulties were readily resolved by the discovery of the two types of mesons. The primaries, designated π , or pions, are produced directly in nuclear reactions but they rapidly decay, when in flight in the atmosphere, to produce the secondary mu-mesons or muons, which proceed nearly in the line of motion of the parent pions and form the penetrating component of the cosmic rays. (142)*

En résumant les résultats de leurs recherches, les physiciens de Bristol tirent les conclusions suivantes(142,143) :

On peut résumer nos résultats en les termes suivants. Nous con-

sidérons que nos observations établissent :

(a) qu'il existe deux types de mésons, de masse différente, que nous appelons mésons π et mésons μ ;

(b) que, conjointement avec les observations de D.H. Perkins, quelques mésons lents peuvent pénétrer dans les noyaux et produire des désintégrations avec émission de particules lourdes ; nous considérons que ces mésons sont chargés négativement et on les appelle, provisoirement, mésons σ ; et

(c) les mésons σ , et possiblement les mésons π , peuvent être produits par des processus associés avec la désintégration explosive des noyaux.

Nos observations suggèrent :

(d) que les mésons π , et une forte proportion de mésons σ , sont des particules du même type chargées, respectivement, positivement et négativement, qui interagissent fortement avec les noyaux, les mésons négativement chargés étant captés aussi bien par les noyaux légers et lourds pour provoquer des désintégrations avec émission de particules lourdes ;

(e) que les mésons π , plus lourds, subissent une désintégration spontanée avec émission des mésons μ , plus légers ; et que dans le processus de désintégration l'impulsion du méson μ est compensée par celle d'une particule neutre d'approximativement même masse.

De plus, les aspects principaux de ces résultats expérimentaux, et de ceux obtenus par coïncidences différées et des expériences en chambre de Wilson, peuvent être expliqués à partir de l'hypothèse que :

(f) la plus grande partie des mésons observés au niveau de la mer, sont des mésons μ formés par la désintégration en vol des mésons π ; et

(g) que les mésons π positifs et négatifs ont une vie courte, avec une vie moyenne dans l'intervalle de 10^{-6} à 10^{-11} s.

Vers la même époque, les physiciens soviétiques ⁽¹⁴⁴⁾, par suite d'une expérience par compteurs à haute altitude, annonçaient l'existence dans le rayonnement cosmique des particules (positives et négatives), appelées varitrons de masse 500, 1000 et 2000 fois la masse de l'électron, et, par une analyse plus complète de leurs résultats ⁽¹⁴⁵⁾, précisaient 14 valeurs différentes de masses allant de 200 à 25.000 m_e ; mais ces expériences n'étaient pas concluantes et ont été critiquées tant en Union Soviétique qu'à l'étranger.

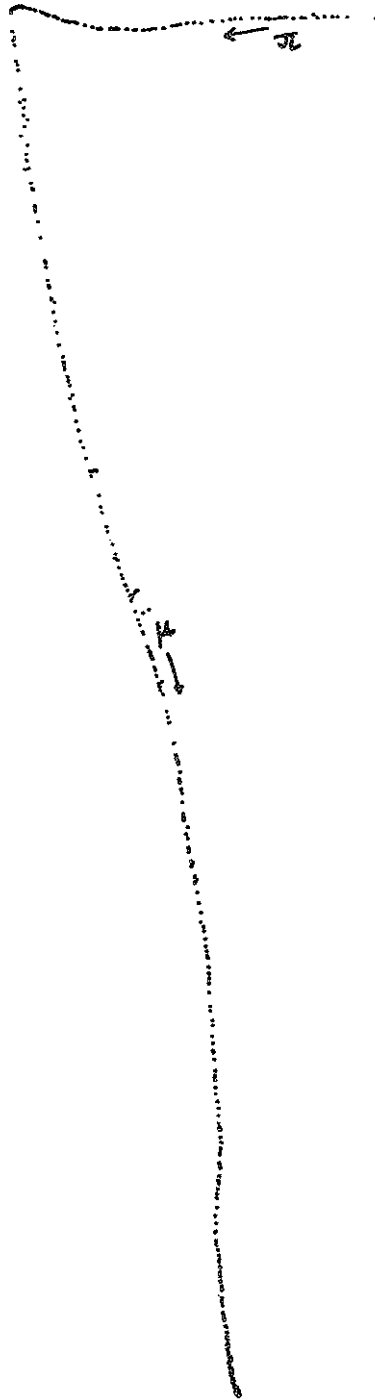


Fig. 12 Première observation de la désintégration d' un méson π en un μ et une particule neutre.

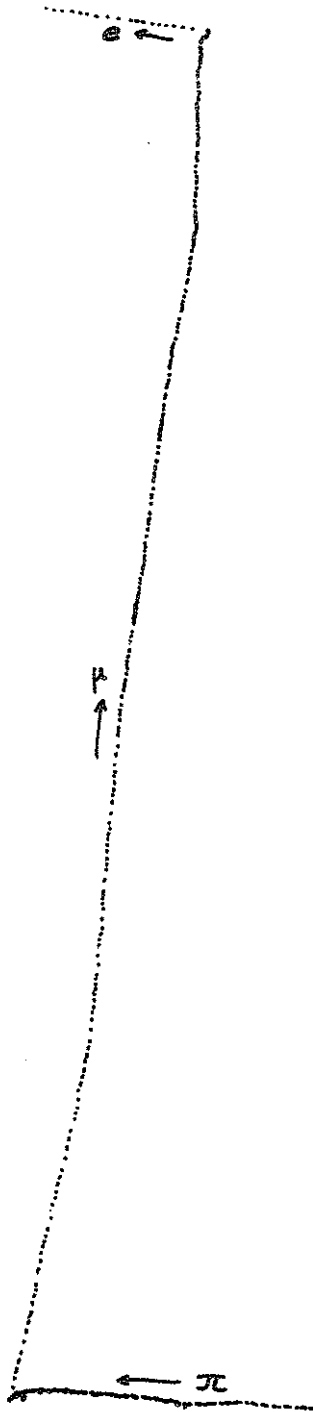


Fig. 13 Première observation de la chaîne complète de désintégration $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ dans une émulsion photographique sensible aux électrons.

De même l'hypothèse d'un méson λ de masse voisine de $10 m_e$ (146,4147), n'a pas été retenue.

Ainsi la recherche des mésotrons aboutissait à la découverte inattendue de deux nouvelles particules, les mésos π^\pm actuellement appelés pions qui semblaient bien être les particules de Yukawa, et de deux autres (les anciens mésotrons), les mésos μ^\pm , actuellement appelés muons qui provenaient de la désintégration des deux précédentes (fig.12). La désintégration des muons en électrons (positifs ou négatifs) ne pouvait pas être observée par la méthode des émulsions nucléaires qui, à l'époque, n'étaient pas sensibles aux particules ionisantes très rapides ; ce n'est que deux ans plus tard (1949) que ces électrons de désintégration ont pu être observés, à l'aide d'émulsions plus sensibles (fig.13).

De même un troisième pion neutre, le π^0 a été découvert peu de temps après⁽¹⁴⁸⁾ ; il se désintègre en deux photons.

Par contre il n'existe pas de muon neutre.*

Cette abondante récolte en particules dans le rayonnement cosmique a été un stimulant puissant pour les cosmiciens, mais, nous le verrons, ce n'est là ni la première ni la dernière surprise que ce mystérieux rayonnement leur réservait.

II.2- LE RAYONNEMENT COSMIQUE UNE MINE DE PARTICULES NOUVELLES

Effectivement, avant même la découverte des pions et des muons, en 1944, une première alerte avait été donnée par L. Leprince-Ringuet et ses collaborateurs⁽¹⁴⁹⁾ qui, effectuant des mesures de masses des particules cosmiques par une chambre de Wilson, avaient obtenu un cliché remarquable montrant un choc élastique d'une particule cosmique contre un électron ; mais tandis que la plupart des autres clichés de cette expérience pouvaient aisément s'interpréter comme représentant des chocs élastiques muon-électron, l'estimation de la masse de la particule primaire de ce cliché donnait une valeur de $(990 \pm 120) m_e$, bien supérieure à la masse des mésotrons ($200 m_e$ approximativement). A la suite de plusieurs mesures de courbure (impulsion)

et d'ionisation (vitesse), le groupe de l'École Polytechnique concluait pour l'existence dans le rayonnement cosmique de particules nouvelles de masse intermédiaire entre celle des mésons et des protons ⁽¹⁵⁰⁾. Dans la même année J. Daudin ⁽¹⁵¹⁾ observait dans une chambre de Wilson sans champ magnétique une trace cosmique qui, subitement subissait une déviation de 10°, mais cet événement n'a pas fait l'objet d'une étude plus complète. Des événements similaires avaient été aussi obtenus par d'autres chercheurs ⁽¹⁵²⁾. Malheureusement ces événements, portés à la connaissance des spécialistes, n'ont pas provoqué d'émotion particulière ; néanmoins "une pierre était lancée dans la mare", et quand, peu de temps après, deux physiciens britanniques ⁽¹⁵³⁾ ont eu la chance d'obtenir à Manchester, dans une chambre de Wilson (dans un champ magnétique de 3500 gauss) deux clichés remarquables (fig.14 a, b) parmi 5000 photographies, ce ne fut pas seulement l'émotion, mais l'excitation générale. Après avoir envisagé plusieurs autres possibilités, ces chercheurs arrivaient à la conclusion que le cliché (a) ne pouvait être interprété que comme la désintégration spontanée d'une nouvelle particule neutre de masse $(700-1000)m_e$; le cliché (b) représentait aussi la désintégration d'une particule chargée de masse supérieure à $980 m_e$, mais certainement inférieure à celle du proton ($1850 m_e$).

Il est curieux de constater que cette même chambre a fonctionné à Manchester de 1947 à 1949 sans qu'aucun autre événement du même genre ait pu être enregistré ^(154,155) ; elle fut alors transportée au Pic du Midi de Bigorre en été 1950 et, après six mois de fonctionnement, 43 autres événements du même type ont été enregistrés dont 36 neutres (type a) et 7 chargés (type b) sur 7000 photographies seulement ⁽¹⁵⁶⁾.

Entre temps, C.D. Anderson et ses collaborateurs ⁽¹⁵⁷⁾, en travaillant au niveau de la mer et à 3200 m d'altitude, en observèrent 34 autres cas (30 neutres et 4 chargés) et confirmèrent l'interprétation de Manchester.

A ce moment P.M.S. Blackett, après avoir consulté Anderson, proposa le nom de "particules V" pour ce nouveau genre d'événements ⁽¹⁵⁶⁾.

Des recherches analogues furent entreprises par plusieurs chercheurs américains (Fretter, Bridge, Annis, Thompson, Leighton...) tandis que les britanniques (Astbury et Newth) s'installaient au laboratoire de Jungfraujoeh (Suisse, 3200 m d'altitude).

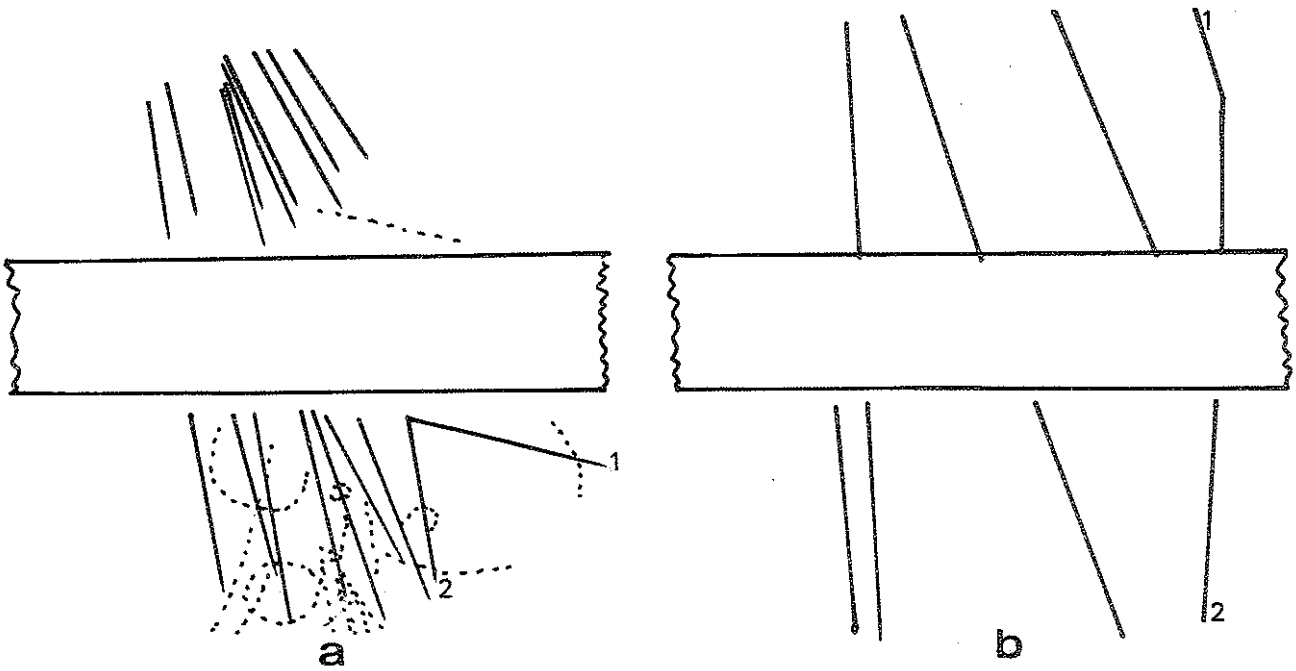


Fig. 14 Reproduction des deux clichés célèbres de Rochester et Butler sur les particules V.

a) Un V^0 (neutre) se désintègre sous la plaque de plomb de 3,4cm d'épaisseur en une particule positive 1 de 0,3 GeV/c et une particule négative 2 non-mesurable. Aucun des secondaires ne peut être un proton (à cause de son ionisation).

b) Un V^+ positif (trace 1) se désintègre avec un angle de 19° , traverse la plaque de plomb et en ressort avec une impulsion de 0,77 GeV/c; ce secondaire est probablement un pion.

Dans un rapport préliminaire, Butler⁽¹⁵⁸⁾, en compilant les résultats des différents groupes jusqu'au printemps 1951, faisait état de 111 particules V neutres en tout. Malgré cette maigre récolte et les difficultés d'identification (traces trop courtes ou en bout de chambre), il semblait bien qu'il y avait, parmi les particules secondaires, des protons et probablement aussi des pions positifs ainsi que des particules négatives difficilement identifiables; et, l'antiproton étant encore inconnu, le groupe du Pic du Midi a suggéré⁽¹⁵⁶⁾ que les particules négatives pourraient être des pions, et proposa les deux schémas de désintégration :

$$V_1^0 \rightarrow p^+ + \pi^- \quad (1)$$

$$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (2)$$

La masse des particules du type V_1^0 était estimée de 2165 à 2226 m_e (avec comme meilleure valeur 2210 m_e) ; celle du type V_2^0 était comprise entre 700 et 1120 m_e (meilleure valeur 700-800 m_e). La vie moyenne commune de ces particules était de l'ordre de 10^{-10} s, mais on n'excluait pas la possibilité de deux vies moyennes différentes. D'autres modes de désintégration n'étaient pas exclus, comme :

$$V^0 \rightarrow p^+ + \pi^- + \pi^0 \quad (3)$$

$$V^0 \rightarrow n + \pi^+ + \pi^- \quad (4)$$

Un V^0 trouvé par la méthode des émulsions⁽¹⁵⁹⁾, avait été aussi interprété suivant le schéma (1).

Par contre, des V chargés on ne connaissait qu'une vingtaine à l'époque ; il y en avait des positifs et plus rarement des négatifs, mais il était impossible de tirer des conclusions valables quant à leur masse, leur désintégration ou leur vie moyenne.

Peu auparavant (1949), quand les émulsions nucléaires sensibles aux électrons furent disponibles, les physiciens de Bristol⁽¹⁶⁰⁾ avaient découvert un événement d'un genre différent (fig.15) : une trace k semblait s'arrêter au point A, d'où partaient trois autres, dont une lente (fortement ionisante) donnait au point B une étoile de capture, les deux autres, plus rapides, sortaient de l'émulsion et n'étaient pas dues à des électrons, mais à des pions ou des muons.

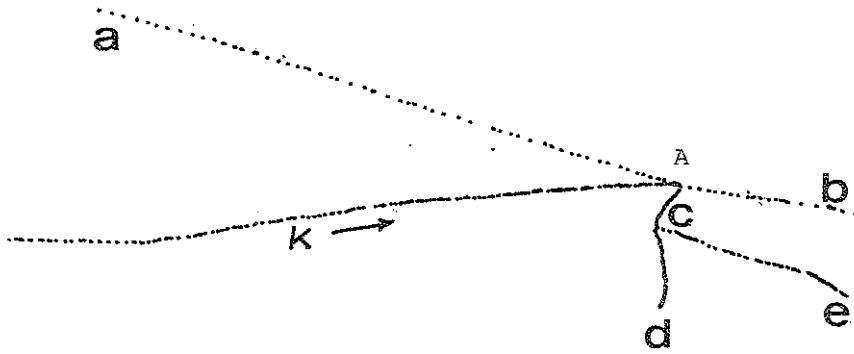


Fig.15 Le premier méson K chargé découvert à Bristol.
(schématique)

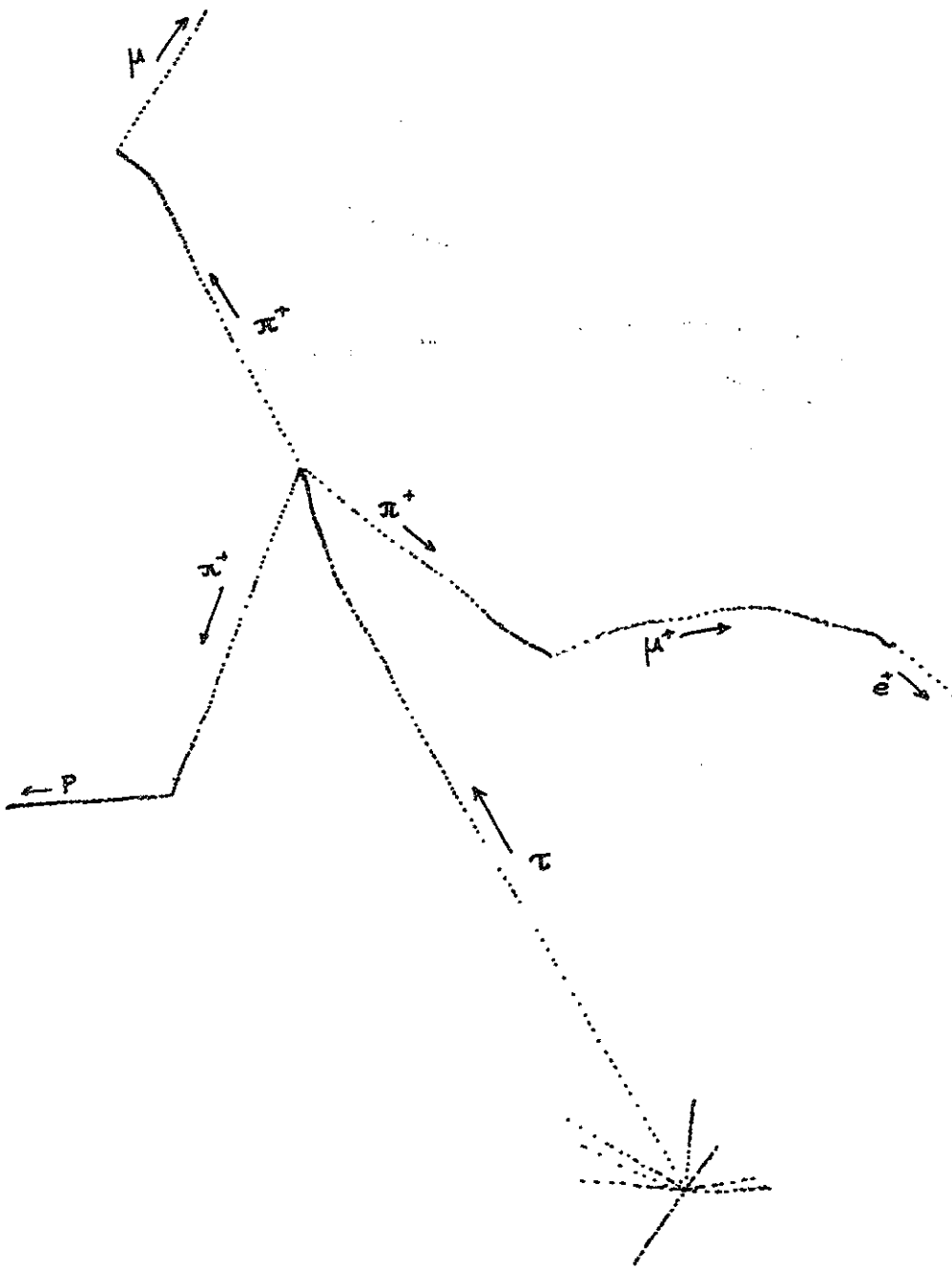


Fig. 16 Désintégration complète d'un méson tau en trois pions.

De plus ces trois traces secondaires étaient pratiquement coplanaires et les mesures de masse du primaire donnaient une valeur de $(1080 \pm 160) m_e$.

Powel raconte pour cet événement, qu'il a "fortement stimulé notre intérêt et notre passion". (142)

Peu à peu d'autres événements du même genre ont été trouvés par différents autres chercheurs (161,162,163) et finalement un événement complet, avec les trois secondaires s'arrêtant dans l'émulsion et identifiés comme des pions, a été trouvé à Padoue (164) (fig 16).

O'Ceallaigh (165) avait trouvé auparavant une autre particule de masse environ $1000 m_e$ qui se désintégrant en donnant un muon bien plus énergétique que celui provenant de la désintégration du pion, et peu après un deuxième de masse $(1125 \pm 140) m_e$ donnant un muon de 5,9 MeV. Si ces deux événements étaient dus à une même particule, il était nécessaire de supposer qu'au moins deux autres particules neutres étaient émises en même temps que le muon (spectre continu) ; c'est bien ce qui a été confirmé plus tard sur un total de 10 exemplaires (!) par Menon et O'Ceallaigh (166), qui ont en outre obtenu des indications précises sur une particule de nature inconnue se désintégrant en un pion chargé, accompagné d'une ou plusieurs particules neutres.

Bref, de 1947 à 1953 une foule de particules nouvelles (autres que les pions et les muons) avait été observée dans le rayonnement cosmique, mais chaque laboratoire n'en possédait qu'un nombre très réduit d'exemplaires, de sorte qu'il était difficile de décider s'il s'agissait d'une même particule ou de particules différentes, tellement les mesures des masses étaient dispersées.

Devant cette diversité le Congrès International sur le Rayonnement Cosmique, organisé en Juillet 1953 à Bagnères de Bigorre, a élaboré une nomenclature plus cohérente pour désigner ces particules (166) ; il a été convenu qu'on appellerait :

Méson L les pions, muons et autres mésons légers ;

Méson K toute particule de masse intermédiaire entre celle du pion et du proton ;

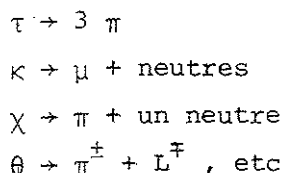
Particules H (actuellement Hypérons Y) les particules dont la masse est comprise entre celle du proton et du deuton.

D'un point de vue purement phénoménologique :

Un événement V, est un phénomène pouvant être interprété comme la désintégration en vol d'un méson L ou d'un Hypéron ;

Un événement S, est tout phénomène pouvant être interprété comme la désintégration ou la capture nucléaire d'un méson lourd ou d'un Hypéron au repos (stopping particle).

Suivant le mode de désintégration, les mésons ont reçu des noms de baptême par des minuscules grecques, les Hypérons par des majuscules grecques, comme par exemple :



Comme L. Leprince-Ringuet le disait dans son discours de clôture de ce Congrès "...nous avons eu des discussions passionnantes sur les problèmes qui, actuellement, nous tiennent à coeur et qui sont en rapport avec la connaissance des différentes sortes de particules, leur naissance, leur vie, leur mort... Il nous apparaît que dans un proche avenir nous allons voir un grand nombre de données expérimentales surgir ou se préciser progressivement". C.F. Powell de son côté, en parlant de l'organisation générale du travail, rappelait cette phrase de Maxwell : "the scattered forces of science are converted into a regular army". Il y avait, en effet, pas moins de 185 participants à cette conférence, venus, confronter et discuter leurs résultats, de tous les pays du monde.

C'est encore à cette occasion que M. Schein a communiqué les premiers résultats sur la production artificielle de particules V par les pions négatifs de 227 MeV du cyclotron de Chicago, ce qui incitait Leprince-Ringuet à lancer un pressant appel aux congressistes : "Nous devons aller vite, nous devons courir sans ralentir notre cadence : nous sommes poursuivis...nous sommes poursuivis par les machines". Quant à la conclusion finale, Powell l'exprimait ainsi : "it appears premature to attempt to give final answer to

many questions of great interest and importance, especially as observations of much greater precision will soon be made with the new techniques described in the conference".

De toute façon, les remarquables résultats présentés à Bagnères par Thompson⁽¹⁶⁷⁾, ont permis d'établir définitivement les schémas de désintégration (1) et (2) ci-dessus, mais il restait encore un certain nombre de V^0 incompatibles avec ces interprétations ; on les appela V^0 anormaux ou V_3^0 , faute de mieux. Nous verrons par la suite leur rôle important.

Ces recherches ont été poursuivies activement pendant les années suivantes, aussi bien par les chambres de Wilson que par les émulsions photographiques. Plusieurs expéditions ont été organisées pour envoyer en haute altitude (30.000 m) des blocs importants d'émulsion, aussi bien en Europe qu'en Amérique, et chaque année un Congrès international était organisé pour la discussion des résultats. Le nombre d'articles publiés est considérable, comme on peut s'en rendre compte par les quelques articles de revue que nous signalons⁽¹⁶⁸⁻¹⁷¹⁾. L'entrée en opération des grands accélérateurs est venue juste à temps pour rendre ces recherches moins pénibles, avec la production artificielle des pions d'abord (1948) puis de toute la gamme des nouvelles particules (mésons K, Hypérons) et à partir de 1953 (Brookhaven), d'anti-protons et antineutrons (Berkeley, 1956). A partir de ce moment une ère nouvelle commence pour la physique des particules et se poursuit intensément de nos jours avec des résultats qui n'ont pas fini d'étonner les physiciens eux-mêmes (expérimentateurs et théoriciens).

Nous allons commencer par passer en revue l'ensemble des nouvelles particules découvertes dans le rayonnement cosmique, avant d'aborder les progrès techniques considérables des moyens d'accélération des particules chargées, qui constituent actuellement les sources pratiquement exclusives de l'expérimentation.

III.1 LES MUONS (μ^+ , μ^-)

Nous avons vu, comment les physiciens de Bristol ont été amenés à distinguer deux types de mésons dans le rayonnement cosmique, les pions (π^\pm) et les muons (μ^\pm). Ce sont ces derniers qui sont les mésotrons que les cosmiciens cherchaient depuis 1935 et qui ont été identifiés avec les produits de désintégration des pions (fig.12,13).

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu \quad (\text{III.1})$$

En effet, le muon émis pendant cette désintégration étant monocinétique, il en résulte, d'après les lois de conservation, qu'il s'agit d'un processus à deux corps ; il restait à identifier la particule neutre émise en même temps que le muon. Or il ne pouvait y avoir que deux possibilités : ou bien il s'agissait d'un photon ou bien de l'hypothétique neutrino.

Une expérience effectuée par Hincks et Pontecorvo⁽¹⁷²⁾ excluait le photon et par conséquent le schéma précédent est le seul possible, si l'on veut éviter l'introduction d'une autre particule nouvelle. Ce processus constitue la principale source de muons, mais nous verrons par la suite qu'il en existe d'autres.

Nous avons aussi vu que les mesures de masse des mésotrons (muons) donnaient des valeurs assez fluctuantes ; les mesures plus précises (à 5% près) des muons cosmiques fournissaient des valeurs meilleures et plus compatibles entre elles⁽¹⁷³⁻¹⁷⁶⁾, mais ce sont finalement les déterminations à 1% près, effectuées auprès des accélérateurs⁽¹⁷⁷⁾, et des mesures plus directes, qui ont conduit à la valeur actuellement admise :

$$m_{\mu} = 105,659 \text{ MeV (soit } 206,77 \text{ me)}$$

Le muon μ^{-} a la même masse que le μ^{+} et il n'existe pas de muon neutre. Par ailleurs, les muons artificiels se sont avérés parfaitement identiques avec les mésotrons cosmiques.

Les tout premiers clichés des mésotrons montraient aussi que le muon est instable et de nombreuses mesures de sa vie moyenne donnaient une valeur assez voisine de celle actuellement admise :

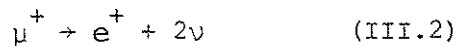
$$\tau_{\mu} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

pour le μ^{+} ; en ce qui concerne le μ^{-} il y a compétition entre désintégration et absorption par la matière, de sorte que sa vie moyenne apparente dépend du nombre atomique du matériau absorbant ; elle est identique à celle du muon positif dans l'hydrogène.

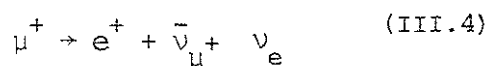
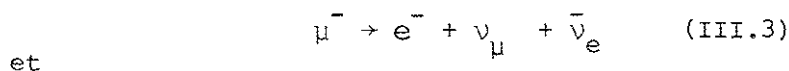
D'après ces propriétés le muon ne pouvait donc pas être la parti-

cule postulée par Yukawa qui devait, d'une part manifester une forte interaction avec la matière et, d'autre part, s'absorber par un noyau en moins de 10^{-18} s.

On a cru pendant longtemps, à cause du petit nombre d'événements observés, que le muon se désintégrait en un électron et un neutrino, mais l'étude plus précise du spectre d'énergie de l'électron de désintégration par plusieurs expérimentateurs ⁽¹⁷⁸⁾ a montré qu'il s'agissait d'un spectre continu allant de 0 à 55 MeV avec une énergie moyenne de 35 MeV*. Il ne pouvait donc s'agir d'une désintégration en deux corps (spectre monocinétique) et il restait à préciser la nature des deux particules neutres émises en même temps que l'électron (c'était l'hypothèse la plus simple). Comme Hincks et Pontecorvo l'ont montré, ⁽¹⁷⁹⁾ ces particules neutres ne pouvaient pas être des photons, d'où le schéma provisoire :



Nous verrons par la suite qu'il a été nécessaire d'introduire deux espèces de neutrinos (et d'antineutrinos), l'un accompagnant le positron dans la radioactivité β^+ , appelé ν_e ($\bar{\nu}_e$ accompagne l'électron de la radioactivité β^-) et l'autre accompagnant le μ^+ dans la désintégration du π^+ , appelé ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$ accompagne le μ^-), de sorte que les schémas corrects de désintégration sont :



Quant au spin du muon, des arguments en faveur de la valeur 1/2 avaient déjà été obtenus par le rayonnement cosmique (sections efficaces des processus électromagnétiques), mais il a été aussi établi directement par la mesure de la fréquence de précession du spin de l'état triplet du muonium μ^+e^- ⁽¹⁸⁰⁾ .

La physique des muons constitue une branche importante de la physique des particules qu'il n'est pas possible d'épuiser ici dans ses détails ; il en existe une abondante bibliographie ^(181,182) .

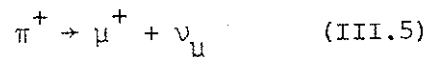
Le résultat le plus frappant et en même temps le plus incompréhensible est que le muon se comporte dans toutes ses propriétés, comme s'il était

une variété d'électron lourd ; c'est ce que l'on désigne par le vocable d'universalité mu-électron.*

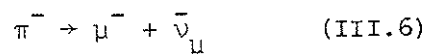
Signalons encore que les muons peuvent être produits en paires $\mu^+ \mu^-$ par la réaction dite de photoproduction, réalisée pour la première fois par l'action des photons de 600 MeV sur les protons ⁽¹⁸³⁾.

III.2 LES PIONS (π^+ , π^0 , π^-).

La particule postulée par Yukawa a été découverte, nous l'avons vu, par les physiciens de Bristol qui ont montré l'existence de deux pions π^+ et π^- , tous deux instables. Les pions positifs se désintègrent toujours avec une vie moyenne de l'ordre de $2,6 \cdot 10^{-8}$ s en un muon monocinétique (4,2 MeV) ; il s'agit donc bien d'une désintégration en deux corps, le second pouvant être un photon ou un neutrino. O'Ceallaigh a pu montrer, sur 253 désintégrations ⁽¹⁸⁴⁾ dans l'émulsion photographique, qu'il ne pouvait pas s'agir de photons (absence d'électrons de matérialisation), d'où le schéma :



Par contre, les π^- sont toujours absorbés dans l'émulsion en donnant lieu à des désintégrations des noyaux (étoiles) ; il était donc impossible d'observer leur désintégration directement. Cette difficulté n'a été résolue qu'à l'aide des accélérateurs, par observation de la désintégration dans le vide ^(185, 186) ou dans la chambre Wilson ⁽¹⁸⁷⁾, ce qui confirme le schéma :



La vie moyenne du π^- est d'ailleurs identique à celle du π^+ ; et il en est de même de leurs masses.

Or, comme nous l'avons vu dans la partie I, l'égalité des forces nucléaires p-p et n-n nécessite aussi la présence d'une particule neutre ⁽¹⁸⁸⁾, mais on n'a pas pu en ce moment observer le π^0 qui n'a été découvert que deux ans plus tard ^(148, 189), encore dans le rayonnement cosmique, mais aussi par les accélérateurs ⁽¹⁹⁰⁾, en détectant en coïncidence les photons de sa désintégration ⁽¹⁹¹⁾, dont la corrélation angulaire est compatibles avec un schéma :



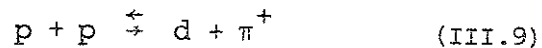
La vie moyenne du π^0 a pu être estimée sur une quinzaine d'événements du rayonnement cosmique⁽¹⁸⁹⁾, comme étant inférieure à 10^{-14} s ; des mesures ultérieures plus précises auprès des accélérateurs ont donné une valeur 100 fois plus faible ($0,84 \cdot 10^{-16}$ s), d'où la difficulté de sa détection.

Sa masse (légèrement inférieure à celle des pions chargés) a été déterminée par l'analyse du spectre des photons émis par la capture des π^- au repos dans l'hydrogène :



La largeur du spectre des photons a permis⁽¹⁹²⁾ d'estimer cette différence à $(10,6 \pm 2,0) m_e$; la valeur actuellement admise est de 4,6 MeV.

La détermination du spin des pions n'a pu se faire que grâce aux accélérateurs, par l'étude des réactions :



dont les sections efficaces fournissent directement le spin du π^+ par application du principe du bilan détaillé ; toutes les mesures effectuées sont en faveur d'un spin séro pour le π^+ ⁽¹⁹³⁻¹⁹⁵⁾ et on admet qu'il en est de même du π^- . Quant au spin du π^0 , le fait qu'il se désintègre en deux photons, montre que son spin doit être entier et des arguments plus subtils, déduits des règles de sélection du système de deux photons, conduisent à attribuer au π^0 un spin nul⁽¹⁹⁶⁾. Les trois pions sont donc des bosons de spin zéro.

L'opération Parité. Parité intrinsèque des particules : la notion de parité, bien connue en physique classique, en chimie (synthèses asymétriques) et en physique nucléaire, est très importante en physique des particules, car elle permet de classer les fonctions d'onde d'un système de particules, suivant leur comportement par inversion des coordonnées d'espace, en fonctions paires ou impaires. Elle lui correspond un opérateur P, unitaire, aux valeurs propres +1 et -1.

Une inversion des coordonnées ($x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$) est aussi équivalente à une réflexion dans un plan (p.ex. le plan xy) suivie d'une rotation de 180° autour d'un axe perpendiculaire à ce plan (axe OZ) ; on parle donc souvent d'une symétrie spéculaire, en négligeant la rotation (inversion et rotation commutent entre elles).

Pour les particules bosoniques (spin entier) et de masse non nulle, on leur attribue une parité bien déterminée qui est +1 ou -1, suivant l'action de l'opérateur parité sur le champ représentatif de la particule :

$$P \phi = p \phi$$

$$P^2 \phi = p^2 \phi = \phi$$

d'où $p^2 = +1$ et $p = \pm 1$

Si $p = +1$, on dit que la particule a une parité paire ; si $p = -1$ la parité est impaire. C'est la parité intrinsèque de la particule.

On classifie alors les bosons, suivant la valeur de leur spin-parité (J^P), comme le montre le tableau suivant :

Table IV

Spin	Parité	Nature de la particule
0	+	Scalaire
0	-	Pseudoscalaire
1	+	Pseudovectorielle
1	-	Vectorielle

Ainsi les pions sont des particules pseudoscalaires ($J^P = 0^-$) (197)*.

La situation est plus compliquée pour les fermions (spin demi-entier). Par convention, on attribue une parité paire aux nucléons (proton et neutron) et une parité impaire aux antinucléons, tandis que bosons et antibosons ont la même parité.

Il n'est pas possible de définir une parité intrinsèque pour le photon (spin 1), à cause de sa masse nulle, qui ne permet pas de lui attacher un référentiel.

Pour un système de particules A et B, sa parité est définie par la relation :

$$P_{AB} = P_A \cdot P_B \cdot (-1)^\ell \quad (\text{III.10})$$

où $(-1)^\ell$ est la parité orbitale.

On définit d'une manière analogue la parité d'un système à plusieurs particules.

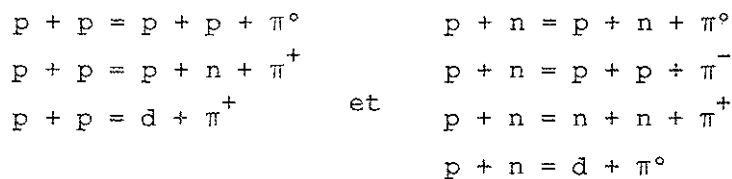
Une ère nouvelle dans la Physique des Particules : la découverte des pions a causé une grande satisfaction et en même temps une grande confusion ; en effet, les théoriciens se sentaient sur le moment incapables "d'apporter un ordre dans les particules connues ou d'en prédire d'autres" ; d'après une expression de R. Feynman "the future of these problems lies almost completely in the hands of the experimenters"⁽¹⁹⁸⁾. Une prophétie largement vérifiée par la suite.

La physique des pions en particulier (mais aussi celle des autres particules) est entrée dans une phase nouvelle à partir de 1948, époque à laquelle le cyclotron de Lawrence de 184 pouces a commencé à produire des pions en abondance, ce qui a permis l'étude complète de leurs propriétés, sous l'impulsion de Fermi, propriétés exposées dans un important article⁽¹⁹⁹⁾ et dans plusieurs livres⁽²⁰⁰⁾ et qu'il serait très difficile de résumer ici.

Des techniques de construction de faisceaux de pions ont été développées très rapidement aux Universités de Chicago, Columbia, Rochester et le Carnegie Institute of Technology, et, malgré l'énergie limitée (50-200 MeV), une compréhension du moins qualitative a été acquise⁽²⁰¹⁾ quant au comportement des pions vis-à-vis des nucléons et des noyaux. Pour les énergies inférieures à 1 GeV les résultats obtenus sont résumés dans la référence⁽²⁰²⁾.

Parallèlement, des progrès considérables ont été accomplis du côté théorique, tant pour l'interprétation des résultats expérimentaux que pour la compréhension des propriétés des pions et des forces nucléaires⁽¹⁹⁹⁾.

Production artificielle des pions. La principale source de pions des différents signes sont les collisions nucléon-nucléon suivant les réactions :



Ces réactions ne peuvent avoir lieu qu'à partir d'une certaine

énergie-seuil (296 MeV), mais sur noyaux plus complexes ce seuil est considérablement abaissé (~ 170 MeV), à cause de mouvement de Fermi à l'intérieur des noyaux.

Un immense matériel expérimental a été accumulé pendant plusieurs années aux faibles énergies (300-400 MeV), puis à des énergies de plus en plus grandes, surtout aux Etats-Unis et en Union Soviétique.

De même l'étude de l'interaction pion-nucléon a donné lieu à de nombreux travaux, mais ce n'est qu'à partir de 1954, quand des cibles à hydrogène liquide furent disponibles, qu'une étude systématique précise a été entreprise ; elle a conduit, entre autres, à la découverte de la première résonance pion-nucléon, le $\Delta(1236)$.

Pour un excellent résumé des travaux effectués jusqu'à 1956 on peut consulter les références ^(199, 201, 202), qui comportent toute la bibliographie afférente.

Photoproduction de pions. Le seuil de production d'un pion par un photon incident est d'environ 150 MeV, mais les sections efficaces de production sont plus faibles d'un facteur 100-1000.

Les processus élémentaires sont :



Les premières expériences de ce genre ont commencé à Berkeley, Cornell, M.I.T., Illinois et Caltech avec des photons de 300-500 MeV. Les premières observations de pions chargés sont celles de Mc Millan et collaborateurs ⁽²⁰³⁾ en 1949 ; le pion neutre a été observé l'année suivante ⁽¹⁹¹⁾.

Ainsi fut définitivement établie l'existence de la triade des pions π^+ , π^- et π^0 .

III.3 LES KAONS (PARTICULES K^+ , K^0 , K^-)

La physique des particules du type K (d'après la nomenclature du Congrès de Bagnères) a connu bien des vicissitudes depuis la découverte de Rochester et Butler⁽¹⁵³⁾ jusqu'à 1956, époque à laquelle la situation a commencé à s'éclaircir. Au fur et à mesure que le nombre d'événements augmentait, il devint possible de classer les particules V positives et négatives en deux catégories, les particules K et les particules H (appelées par la suite Y) et il en était de même des V^0 , dont on distinguait les V_1^0 (hypérons) et les V_2^0 (ou K^0), à ceci près qu'il semblait bien exister quelques cas de V^0 dit anormaux, ne rentrant dans aucune de ces deux catégories et qu'on désignait, selon les laboratoires, par V_3^0 , V_4^0 , etc.

Il y avait pendant cette période transitoire (1947-1957) toute une variété de particules du type K avec des nombreux modes de désintégration et dont la masse et la vie moyenne n'étaient connues qu'avec une précision trop médiocre pour pouvoir trancher s'il s'agissait vraiment de particules différentes ou bien d'une seule, présentant différents modes de désintégration. On distinguait ainsi, suivant le signe de la charge électrique^(204, 207):

a) Les kaons positifs (K^+)

1/ $K^+_{\pi_3} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, appelé aussi τ et observé pour la première fois à Bristol⁽¹⁶⁰⁾; deux autres exemplaires ont été découverts aussitôt après⁽¹⁶¹⁾, puis un quatrième⁽¹⁶²⁾, dont les trois secondaires semblaient être probablement des pions; un autre a été trouvé à Rome⁽¹⁶³⁾ et finalement le groupe de Padoue⁽¹⁶⁴⁾ a découvert un événement complet dont les trois secondaires s'arrêtaient dans l'émulsion, ce qui confirmait pleinement ce mode de désintégration (fig.16).

2/ $K^+_{\mu_3} \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu$, appelé au début κ ⁽¹⁶⁵⁾ et dont on ne connaissait que 10 exemplaires jusqu'en 1954⁽¹⁶⁶⁾. Il a été repéré par son muon de désintégration, trop énergétique pour provenir d'une désintégration $\pi \rightarrow \mu$; un deuxième exemplaire donnait un muon peu énergétique (5,9 MeV), ce qui a fait penser à un mode de désintégration en trois corps, confirmé sur 8 autres exemplaires⁽¹⁶⁵⁾. Le π^0 était certainement difficile à identifier à l'époque, mais par la suite on a pu observer son mode de désintégration rare $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$ ^(190, 191), ce qui rendait ce schéma plus probable.

3/ $K^+_{\pi 2} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$, appelé aussi $\chi^{(165,166)}$, confirmé par le groupe de M.I.T. ⁽²⁰⁸⁾ par son π^+ monocinétique et par les photons de désintégration du π^0 ⁽²⁰⁹⁾ ou des paires e^+e^- ^(210,211).

4/ $K^+_{\pi 3} \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ ou τ^+ , prédit par Dalitz ⁽²¹²⁾ et découvert par le groupe de Rochester ⁽²¹³⁾.

5/ $K^+_{\mu 2} \rightarrow \mu^+ + \nu$, découvert par le groupe de l'Ecole Polytechnique ⁽²¹⁴⁾, au moyen d'une chambre Wilson à deux étages et confirmé par le groupe de M.I.T. ⁽²⁰⁹⁾.

6/ $K^+_{e 3} \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu$, trouvé à Bristol ⁽²¹⁵⁾ grâce à son électron (90 MeV/c) ; son mode de désintégration n'a pu être précisé que plus tard ⁽²¹⁶⁾.

On trouvera dans la table des particules la liste complète des différents modes de désintégration des particules K^+ qui se sont avérées par la suite parfaitement identiques entre elles. En effet, les mesures précises effectuées auprès des accélérateurs ⁽²¹⁷⁻²¹⁹⁾ ont montré qu'elles ont même masse, même vie moyenne et différents modes de désintégration. Nous reviendrons par la suite sur un certain nombre de difficultés qui ont surgi à propos de ces particules K aussi bien chargées que neutres.

b) Les kaons neutres (K^0)

Comme pour les K^+ , l'étude des V^0_2 ou K^0 a montré qu'ils possèdent plusieurs modes de désintégration et notamment :

1/ $K^0_{\pi 2} \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ou θ^0 , mode auquel appartenait très probablement le cliché (a) de Rochester et Butler ⁽¹⁵³⁾ (fig.15). C'est le mode le plus facile à identifier par la présence de deux particules chargées coplanaires avec le point de production du K^0 (quand celui-ci est visible). ⁽²²⁰⁻²²⁴⁾

2/ $K^0_{\pi 2} \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ ou θ^0 . Ce mode n'a pu être établi qu'auprès des accélérateurs par détection des paires e^+e^- de matérialisation des photons provenant de la désintégration des π^0 ⁽²²⁵⁾ (fig.17).

3/ $K^0 \rightarrow 3$ ou plusieurs particules secondaires dont deux chargées. Comme nous l'avons déjà vu, environ 10% des V^0 trouvés dans le rayonnement cosmique ne répondaient pas aux schémas de désintégration des V^0_1 ou des V^0_2 ; on les appela

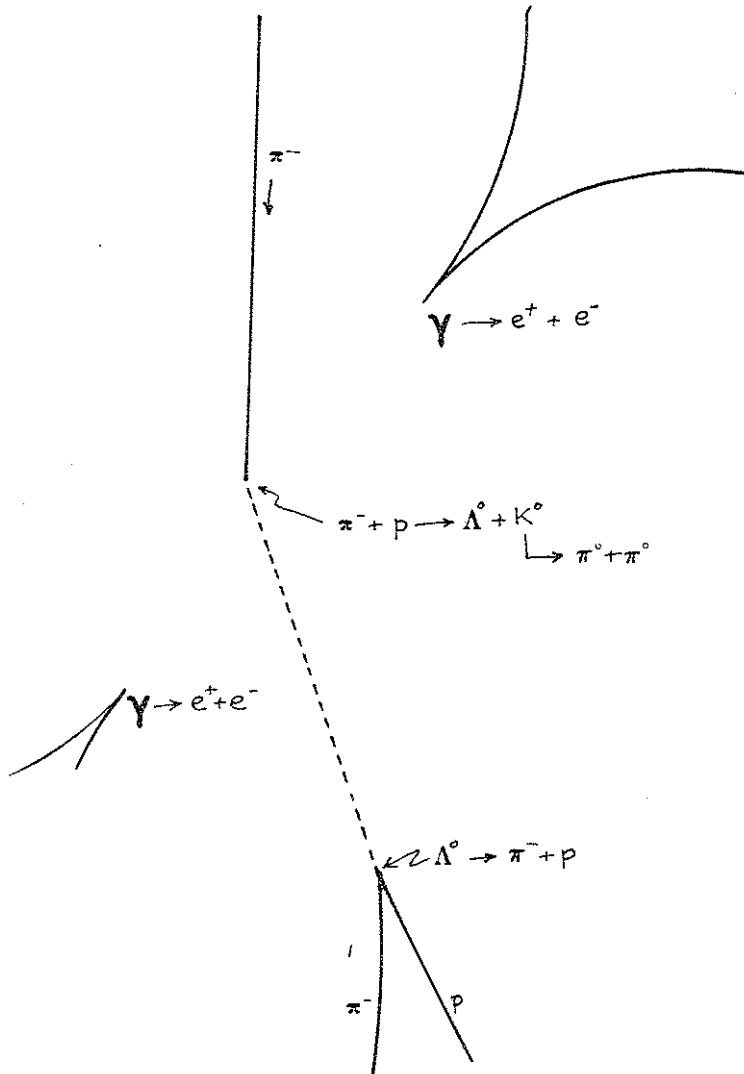
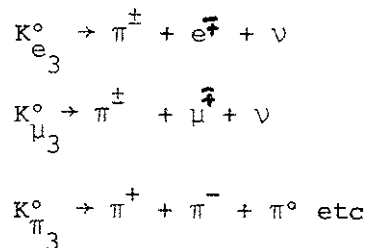


Fig. 17 Production associée d'un Λ et d'un K^0
(le K^0 se désintègre en deux pions neutres dont
on voit les paires de matérialisation des deux
photons(Steinberger).

V° anormaux. La nature des particules de désintégration n'était pas bien connue, mais les valeurs de l'énergie de désintégration Q^* semblaient très dispersées entre 6 et 300 MeV ; on pensait donc que ces événements pouvaient bien être un mélange de différents modes de désintégration en plusieurs corps et l'on a envisagé successivement les modes les plus simples :



La question des mésons K neutres est restée confuse pendant assez longtemps, à cause surtout du petit nombre d'événements dits anormaux ; il semblait en effet qu'il en existait deux sortes ayant des modes de désintégration différents, mais rien ne permettait de dire s'il s'agissait de deux particules différentes ou bien de différents modes de désintégration d'une même particule.

Ce problème n'a pu être résolu que quelques années plus tard, grâce à une audacieuse hypothèse avancée par Gell-Mann et Pais⁽²²⁶⁾ sur le comportement des particules neutres par l'opération de conjugaison de charge qui transforme une particule en son antiparticule. Nous reviendrons par la suite sur cette hypothèse et ses conséquences expérimentales ; pour le moment nous nous contenterons de noter qu'elle a été brillamment confirmée par l'expérience⁽²²⁷⁾ qui a permis d'établir l'existence de deux kaons neutres ayant des vies moyennes et des modes de désintégration différents.

c) Les kaons négatifs (K^-)

La question des K^- était au début plus délicate que celles des K^+ , à cause surtout du petit nombre d'événements observés (il n'y avait qu'une quinzaine jusqu'à 1956) et de leur forte interaction avec la matière (absorption). Malgré tout, un certain nombre de modes de désintégration a pu être mis en évidence :

1/ $K_{\pi_3}^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^-$, établie sur une douzaine de cas⁽²²⁸⁻²³¹⁾, dont 4 par accélérateurs. C'est la contrepartie négative du τ^+ , appelé aussi τ^- , et de même masse que lui.

2/ $K_{\pi_2}^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$, observé au bévatron de Berkeley⁽²³²⁾, identifié par mesure directe de sa masse et par l'étoile de capture du pion négatif ; on l'appelle aussi θ^- .

3/ $K_{e_3}^- \rightarrow e^- + \gamma\gamma$ dont le seul exemplaire observé⁽²³²⁾ donnait un électron bien identifié.

4/ Quelques autres événements observés en chambre de Wilson, laissaient soupçonner l'existence d'autres modes de désintégration ($K_{\mu_2}^-$, $K_{\mu_3}^-$...) ⁽²³³⁾.

La masse et la vie moyenne des K^- se sont avérées identiques à celles des K^+ , malgré la grande dispersion des valeurs numériques individuelles du moment ^(234,235).

III.4 LES HYPERONS (Σ)

a) L'hypéron positif sigma + (Σ^+)

Le premier événement de ce type a été présenté à la conférence de Bagnères ^(167,206,236) par les groupes de Gênes et de Milan qui ont observé dans une émulsion photographique la trace d'une particule de masse $(2330 \pm 800)m_e$, s'arrêtant dans l'émulsion et donnant un secondaire assez énergétique (fig 18). D'autres événements semblables ont été observés par la suite avec des secondaires identifiés comme des pions monocinétiques ou des protons de faible énergie (environ 19 MeV) ⁽²⁰⁶⁾.

Les événements à proton ont été attribués à la désintégration :



ceux à pion, à la désintégration :



Ces deux schémas ont été finalement confirmés par de nombreux cas trouvés auprès des accélérateurs.



Fig. 18 Premier exemplaire d'un hypéron Σ^+ observé dans une émulsion photographique; il se désintègre en un pion positif et un neutron.

b) Les hyperons neutres

1/ L'hyperon lambda-zéro (Λ^0)

Après la première découverte des particules V, le groupe de Manchester ⁽¹⁵⁶⁾ a pu mettre en évidence deux principaux modes de désintégration des V^0 :



appelés respectivement Λ^0 et K^0 ou θ^0 .

Le proton de désintégration était facile à identifier dans 4 cas. Un autre événement a été observé dans les émulsions ⁽²³⁷⁾ et 4 autres en chambre de Wilson par Thompson et ses collaborateurs ⁽²³⁸⁾.

Le schéma (III.13) a été pleinement confirmé par estimation des masses des particules secondaires (ionisation et diffusion multiple) et par la coplanarité des secondaires avec le point où prenait naissance le V^0 ; la valeur Q de la désintégration était unique et voisine de 37 MeV (sur 50 cas rapportés à Padoue, 1954). La masse et la vie moyenne pouvaient alors être calculées avec une assez bonne précision (voir table des particules).

Un autre mode de désintégration :



a été découvert ⁽²²⁵⁾ par détection des photons de désintégration du π^0 , dont le spectre était incompatible avec un mode :



Pour plus de détails sur cet hyperon on peut consulter le rapport de Thompson ⁽²³⁹⁾ et la référence ⁽²⁰⁶⁾.

Notons seulement qu'il n'existe pas de particule chargée ayant les mêmes caractères que le Λ^0 .

2/ L'hypéron sigma-zéro (Σ^0)

Prédit théoriquement par Gell-Mann⁽²⁴⁰⁾ et Nishihima⁽²⁴¹⁾, cet hypéron devrait se désintégrer rapidement suivant le mode :

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma \quad (\text{III.17})$$

c'est-à-dire en deux particules neutres, difficiles à identifier. C'est la raison pour laquelle elle n'a été découverte qu'auprès des accélérateurs, grâce à la réaction de production associée⁽²⁴²⁾ :

$$\begin{aligned} \pi^- + p &= \Sigma^0 + K^0 & (\text{III.18}) \\ &\quad \downarrow \\ &\quad \Lambda^0 + \gamma \end{aligned}$$

Une analyse complète de cette réaction a pu être faite⁽²⁴³⁾.

Dans les chambres à bulles à hydrogène, on a pu observer la désintégration du Σ^0 , produit par⁽²⁴⁴⁾ : (fig.20)

$$\begin{aligned} \Sigma^- + p &\rightarrow \Sigma^0 + n & (\text{III.19}) \\ &\quad \downarrow \\ &\quad \Lambda^0 + \gamma \end{aligned}$$

tandis que la chaîne (III.18) a pu être observée (fig.20) dans une chambre à bulles à liquide lourd⁽²⁴⁵⁾. Un événement exceptionnel a été observé à Brookhaven⁽²⁴⁶⁾ par la réaction (III.18), suivie de la chaîne :

$$\begin{aligned} \Sigma^0 &\rightarrow \Lambda^0 + \gamma & (\text{III.20}) \\ &\quad \downarrow \\ &\quad e^+ + e^- \end{aligned}$$

et

$$K^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp (e) + \nu$$

où le K^0 se désintègre en trois corps (fig.21).

3/ L'hypéron ksi-zéro (Ξ^0)

A la Conférence Internationale sur les Utilisations Pacifiques de l'Energie Atomique (Genève, 1958) le groupe du Pic du Midi de l'Ecole Polytechnique⁽²⁴⁷⁾ a présenté une photographie pouvant être interprétée par la désintégration d'un hypéron neutre :

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0 \quad (\text{III.21})$$

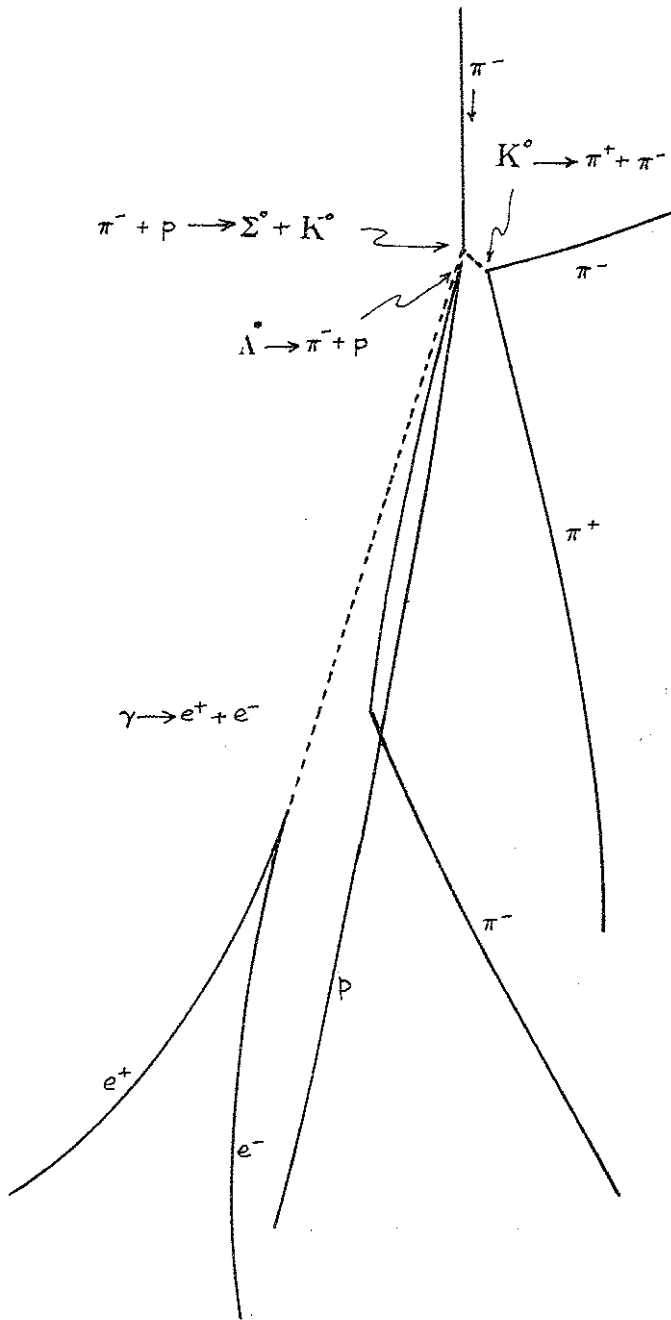


Fig.19 Production associée d'un Σ^0 et d'un K^0 . Le Σ^0 se désintègre très vite en un Λ^0 et un photon dont on voit les électrons de matérialisation; le K^0 se désintègre en $\pi^+ \pi^-$.

(D'après la réf.242)

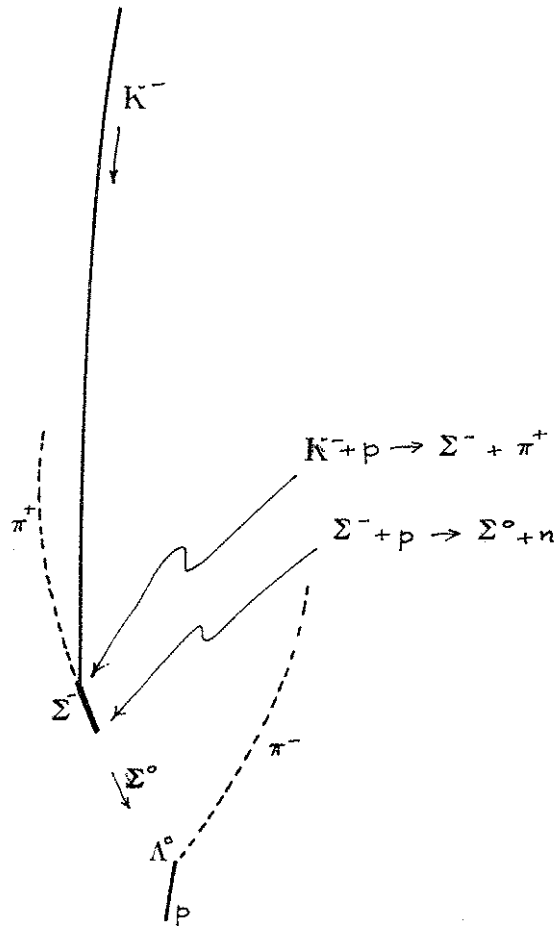


Fig. 20 Capture d'un méson K^- par un noyau d'hydrogène qui se désintègre en un Σ^- et un pion positif. Le Σ^- est capté à son tour par un autre noyau d'hydrogène en donnant un Σ^0 (invisible) et un neutron. Finalement le Σ^0 se désintègre en $\Lambda^0 + \gamma$ et le Λ^0 se désintègre aussi en $p + \pi^-$ (Réf. 244).

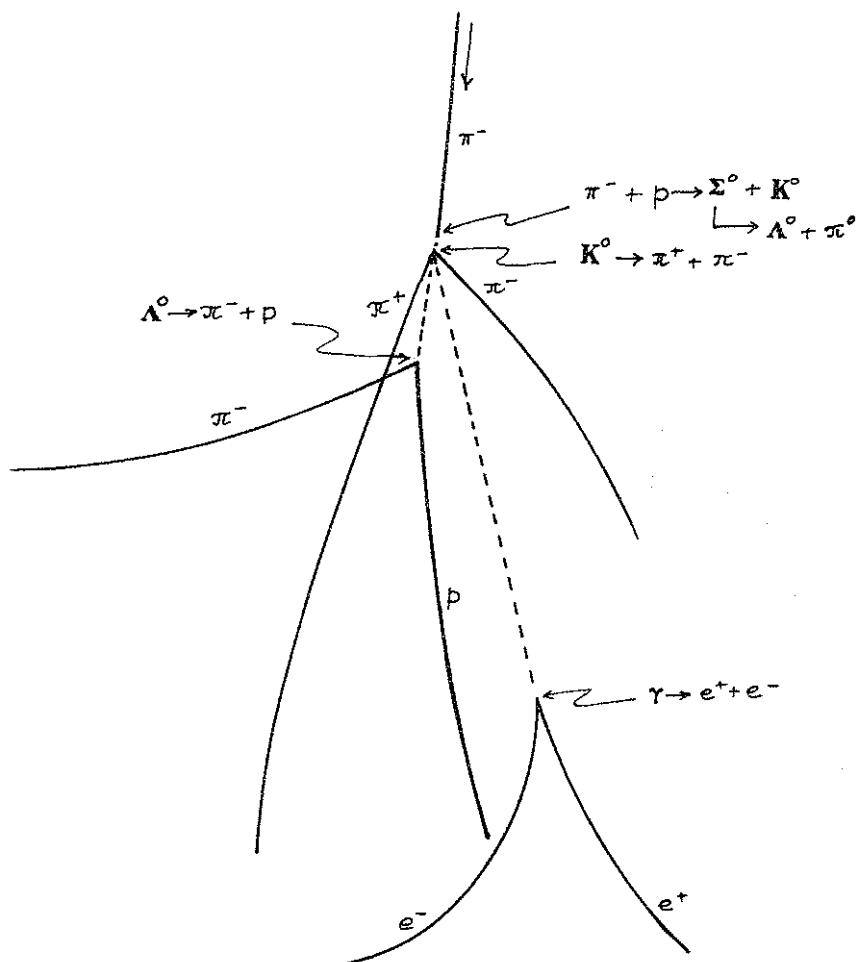


Fig.21 Production associée d'un Σ^0 et d'un K^0 suivie de leur désintégration.(Réf.246).

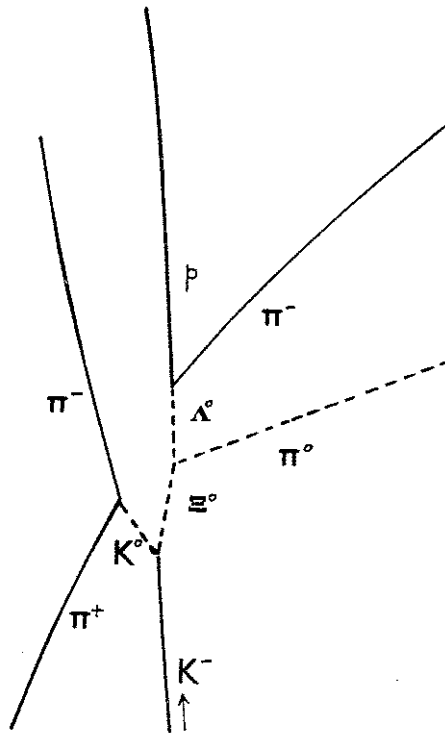


Fig.22 Production associée d'un K^0 et d'un Ξ^0 suivie de leur désintégration (Réf.248).

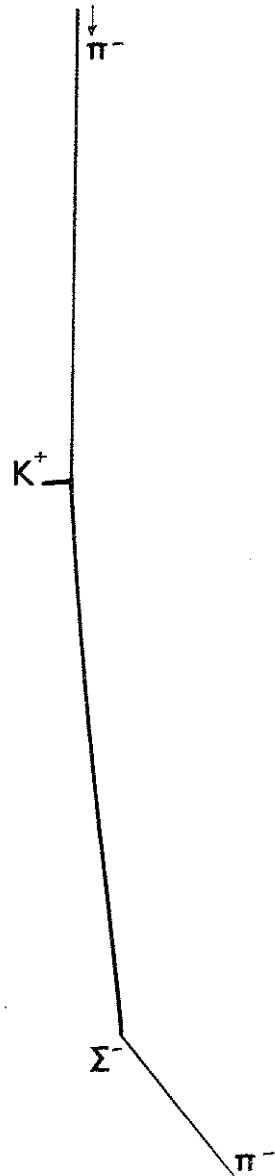


Fig.23 Production associée d'un K^+ et d'un Σ^- .

(Réf.251).

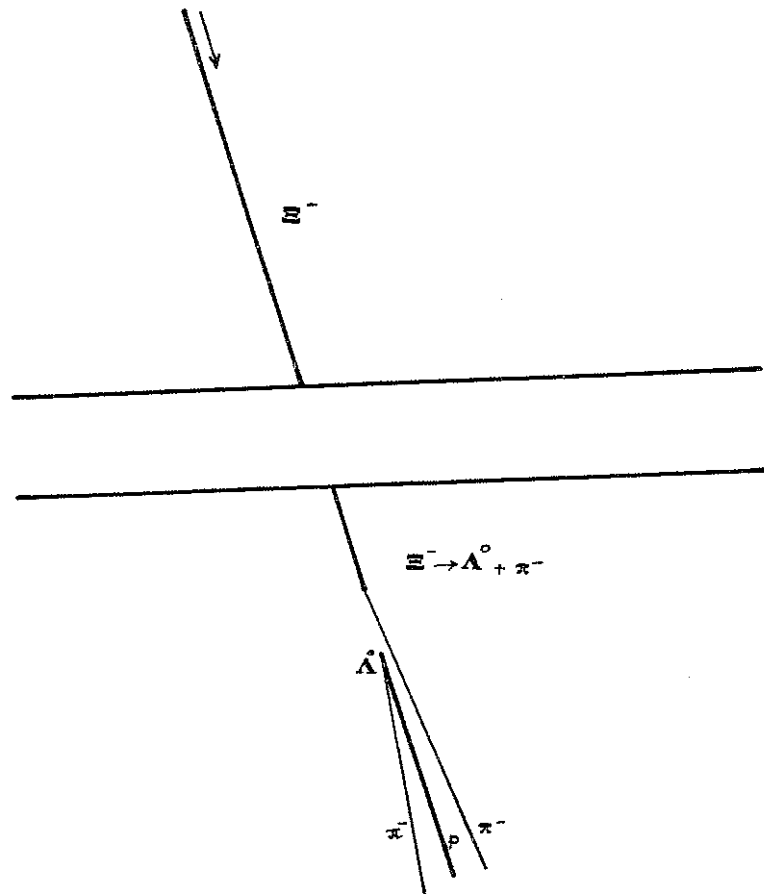


Fig.24 Première observation d'un hypéron Ξ^- .

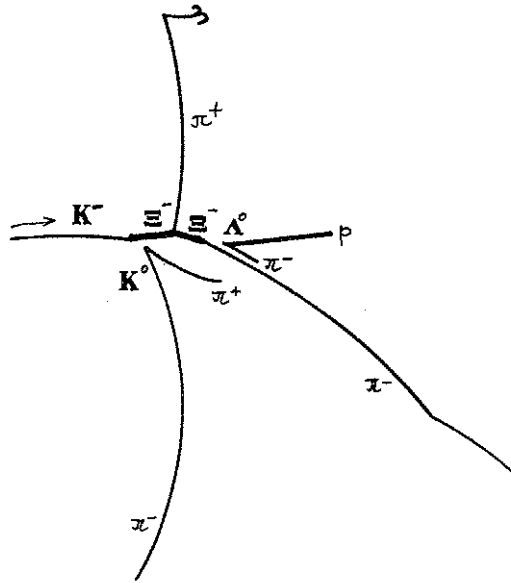


Fig25 Production associée $K^- + n = \Xi^- + K^0$ suivie d'une interaction inélastique du Ξ^- avec un noyau et de sa désintégration subséquente en $\Lambda^0 + \pi^-$.

(D'après L.Jauneau et al. Phys. Letters 5, 261, 1963).

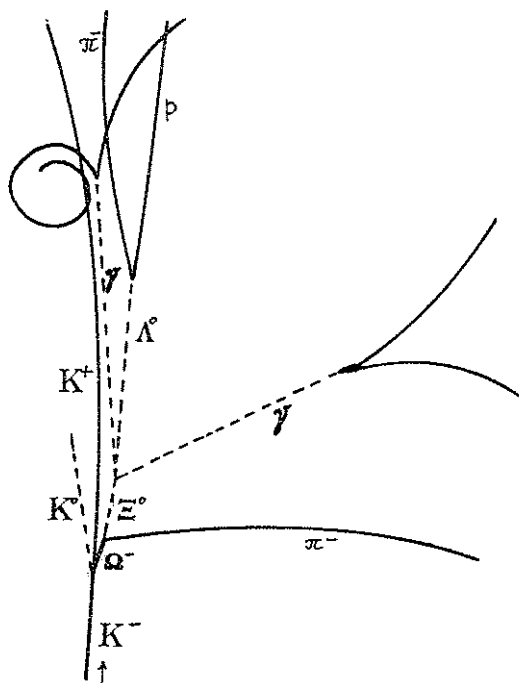


Fig. 26 Reproduction schématique du premier hypéron Ω^- artificiellement produit d'après la référence 256.

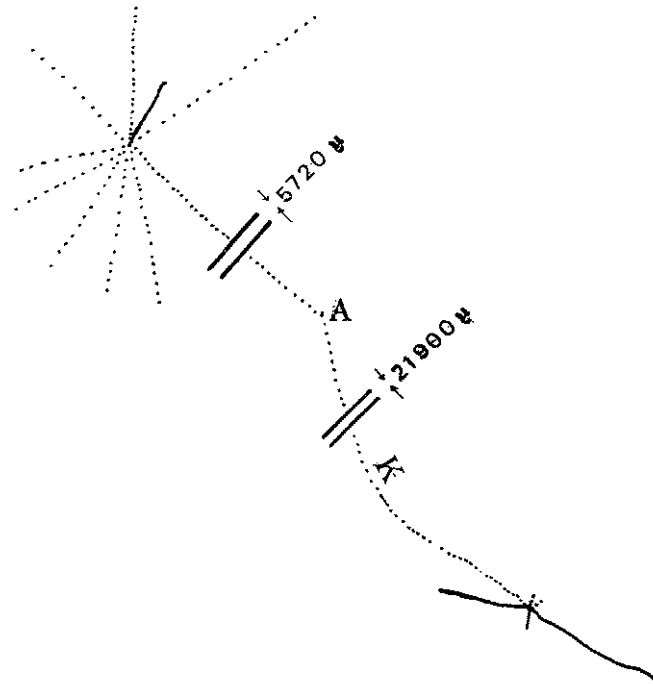


Fig.27 Cet événement décrit dans la référence 257' est très probablement le tout premier hyperon $\bar{\Omega}$ observé dans une émulsion photographique. Produit dans une étoile cosmique, il se désintègre au point A en donnant un \bar{K} .

2/ L'hypéron Ξ^-

C'est en 1952 que le groupe de Manchester avait signalé l'existence d'une particule négative instable, se désintégrant en un V^0 et un méson léger négatif de faible énergie ⁽²⁵³⁾ (fig.24). La ligne de vol du V^0 passait par le point de désintégration de la particule primaire, mais il était difficile à dire qu'il s'agissait sûrement d'un Λ^0 . En faisant cette hypothèse, la masse du primaire était estimée à $(2500-2800)m_e$.

Une quinzaine d'exemplaires trouvés par la suite a permis d'établir le schéma de désintégration ^(254,255)

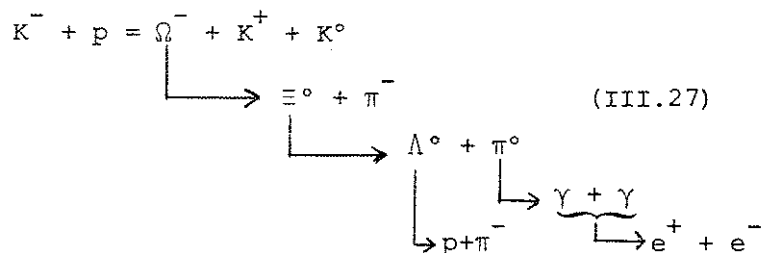


et de déterminer la masse et la vie moyenne de cette particule.

Notons que jusqu'à présent il n'a pas été trouvé de particule ksi positive.

3/ L'hypéron oméga-moins (Ω^-)

Ce nom avait été proposé en 1956 par Gell-Mann ⁽²⁴⁰⁾ pour un hypéron négatif d'étrangeté-3, suggéré par son schéma des "multiplets de charge déplacée" et devant se désintégrer en un Ksi et un pion ou un gamma. Elle ne fut découverte que dix ans plus tard à Brookhaven ⁽²⁵⁶⁾ par la réaction (fig 26) :



Ce serait le seul hypéron découvert à l'aide des accélérateurs (dans environ 100 000 clichés), si un événement remarquable du même genre n'eut été trouvé dans le rayonnement cosmique ⁽²⁵⁷⁾ en 1954 par la méthode des émulsions photographiques (fig.27). Une trace sortant d'une étoile cosmique subit une brusque déviation de 10° après un parcours de 5720 microns, pour s'arrêter 24,2 mm plus loin en produisant une étoile de capture. Après

le coude la trace était identifiée comme étant un K^- , tandis que la détermination de la masse avant le coude donnait une valeur de $(3220 \pm 700)m_e$, incompatible avec les masses de toutes les autres particules connues.

Des événements du même type ont été observés aussi à Wisconsin⁽²⁵⁸⁾, mais n'ont pas beaucoup attiré l'attention. La question a été reprise récemment par L. Alvarez⁽²⁵⁹⁾ qui est arrivé à la conclusion que tous ces événements étaient effectivement des oméga-moins.

Il est vrai qu'il s'agit d'événements extrêmement rares, dont on ne connaît actuellement que 41 exemplaires dans le monde entier (1976).

d) Les hyperfragments

Un autre événement curieux (fig. 28) a été découvert⁽²⁶⁰⁾ dans le rayonnement cosmique en 1953 ; une trace sortant d'une étoile cosmique se désintègre spontanément en trois particules chargées, dont aucune ne semble être un méson. Ce phénomène a été interprété comme la désintégration d'un fragment de noyau de l'émulsion dans lequel un neutron serait remplacé par un hyperon Λ^0 , ce dernier se désintégrant par la suite avec émission d'un pion (désintégration mésonique) ou avec absorption de celui-ci par un noyau qui éclate par la suite. De nombreux autres hyperfragments ont été découverts depuis et l'on pense qu'il s'agit d'un phénomène général de formation de noyaux contenant un hyperon à la place d'un nucléon qui peut être aussi bien un Λ un Σ ou un Ξ .

Telle fut, dans ses grandes lignes, l'abondante récolte en particules nouvelles depuis la découverte des pions (1947) jusqu'en 1957, époque à laquelle les nouveaux accélérateurs sont intervenus pour donner une impulsion considérable à la physique des particules, dont le nombre était devenu si grand que, d'une part de nouveaux problèmes n'allaient pas tarder à surgir et, d'autre part leur étude par le rayonnement cosmique posait des problèmes pratiquement insolubles, malgré les importants renseignements qu'elle avait déjà fourni.

Il était donc parfaitement clair à ce moment, que ces recherches ne pouvaient être conduites convenablement, que si l'on pouvait disposer de

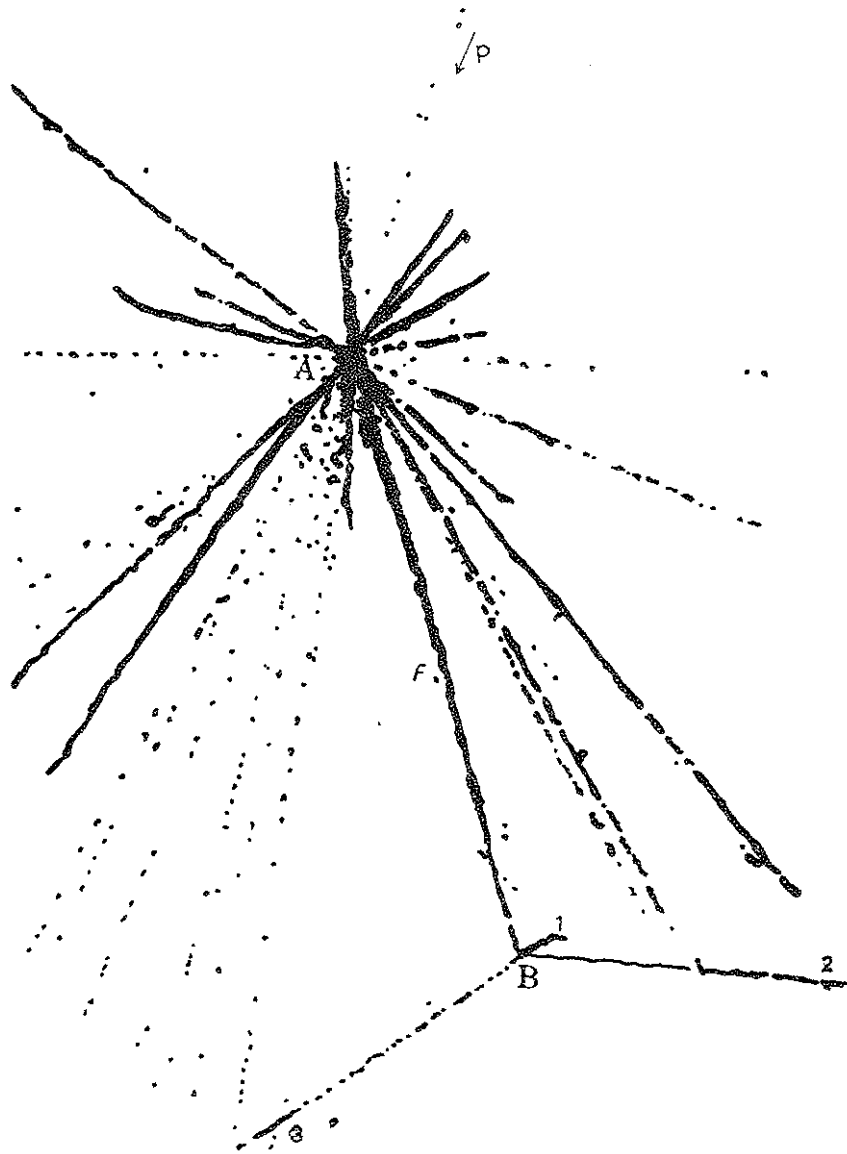


Fig. 28 Le premier hyperfragment observé dans une émulsion photographique. Il se désintègre au point B en trois particules dont aucune n'est un méson.

faisceaux contenant des quantités considérables de particules habituelles (protons, pions, etc) et d'une énergie suffisante pour en produire des nouvelles.

D'où le développement spectaculaire des accélérateurs qui a été d'une rapidité stupéfiante.

IV. LES TECHNIQUES EXPERIMENTALES

I. LES ACCELERATEURS DES PARTICULES

La découverte des mésotrons dans le rayonnement cosmique et la cadence très lente de l'arrivée de ces particules à la surface de la terre, a incité les physiciens dès 1938 à la recherche de nouvelles méthodes d'accélération des particules chargées (principalement des protons, des deutons et des particules alpha), à des énergies capables de les produire à volonté au laboratoire. A ce point de vue les machines classiques (cyclotrons) présentaient des limitations sévères en énergie (quelques dizaines de MeV) et nécessitaient des aimants aux dimensions prohibitives, à cause de l'augmentation relativiste de la masse avec la vitesse des particules, qui les éloignait de la condition de résonance avec la fréquence du champ électrique accélérateur.

Pour contourner cette difficulté, L. Thomas⁽²⁶¹⁾ avait suggéré en 1938 de faire varier le champ magnétique pendant l'accélération de façon que les particules puissent trouver une trajectoire "isochrone", décrite toujours dans le même temps. D'autre part, à la fin de la guerre, V. Veksler⁽²⁶²⁾ en U.R.S.S. et, indépendamment de lui, E.M. MacMillan⁽²⁶³⁾ aux U.S.A. ont proposé une méthode de "stabilité de phase", permettant, par modulation de la fréquence du champ électrique accélérateur, de maintenir les particules en phase avec la tension. Un projet analogue avait aussi été élaboré à Birmingham par M.L. Oliphant, mais n'avait pas été publié. De même le premier projet de M.W. Brobeck sur une machine de 184 pouces, pouvant accélérer des protons à des énergies de plusieurs centaines de MeV avait été interrompu par la déclaration des hostilités.

Ce n'est donc qu'en 1945 que l'aimant de 184 pouces de l'université

de Californie, destiné au cyclotron géant de E.O. Lawrence, a été converti en synchrocyclotron à protons.

On envisageait, en effet, trois types d'accélérateurs :

1/ Les synchrocyclotrons à champ magnétique constant, pouvant accélérer des particules semi-relativistes sur une orbite constante par modulation de la fréquence du champ électrique.

2/ Les synchrotrons à électrons, accélérant des particules déjà relativistes, à l'aide d'un champ magnétique variable, tout en maintenant constant le champ électrique.

3/ Les synchrotrons à protons combinant les deux principes précédents pour obtenir une orbite stable.

Plusieurs projets ont été ainsi mis à exécution et rapidement terminés, parmi lesquels le cosmotron de Brookhaven, devenu opérationnel en Juin 1952 à 2,3 GeV et qui fournissait des protons de 3,0 GeV au début de l'année 1954, le bévatron de Berkeley qui a été poussé à 6,2 GeV, le synchrotron Saturne de Saclay à protons de 3,0 GeV, le synchro-phasotron de Dubna (U.R.S.S.), etc.

Parallèlement à ces accélérateurs circulaires, se développaient les machines linéaires, comme le Linac de L. Alvarez⁽²⁶⁴⁾ à protons, ou les machines à électrons, dont la plus récente, celle de SLAC à Stanford, fournit des électrons de 20 GeV.

Vers 1950 un nouveau principe d'accélération, breveté par N. Christophilos (1949) et redécouvert à Brookhaven⁽²⁶⁵⁾, a été mis à profit ; c'est le principe de "focalisation forte" ou "à gradient alterné" qui, par application successive de forces intenses de focalisation et de défocalisation, permet d'obtenir une focalisation forte des particules, en réduisant l'amplitude de leurs oscillations. Il a été ainsi possible d'obtenir des protons de 30 GeV avec l'A.G.S. (alternating gradient synchrotron) de Brookhaven, 28 GeV avec le P.S. (proton synchrotron) du C.E.R.N. et 75 GeV avec la machine de Serpukhov (U.R.S.S.).

A partir de 1964 des nouveaux projets ont été étudiés, visant à

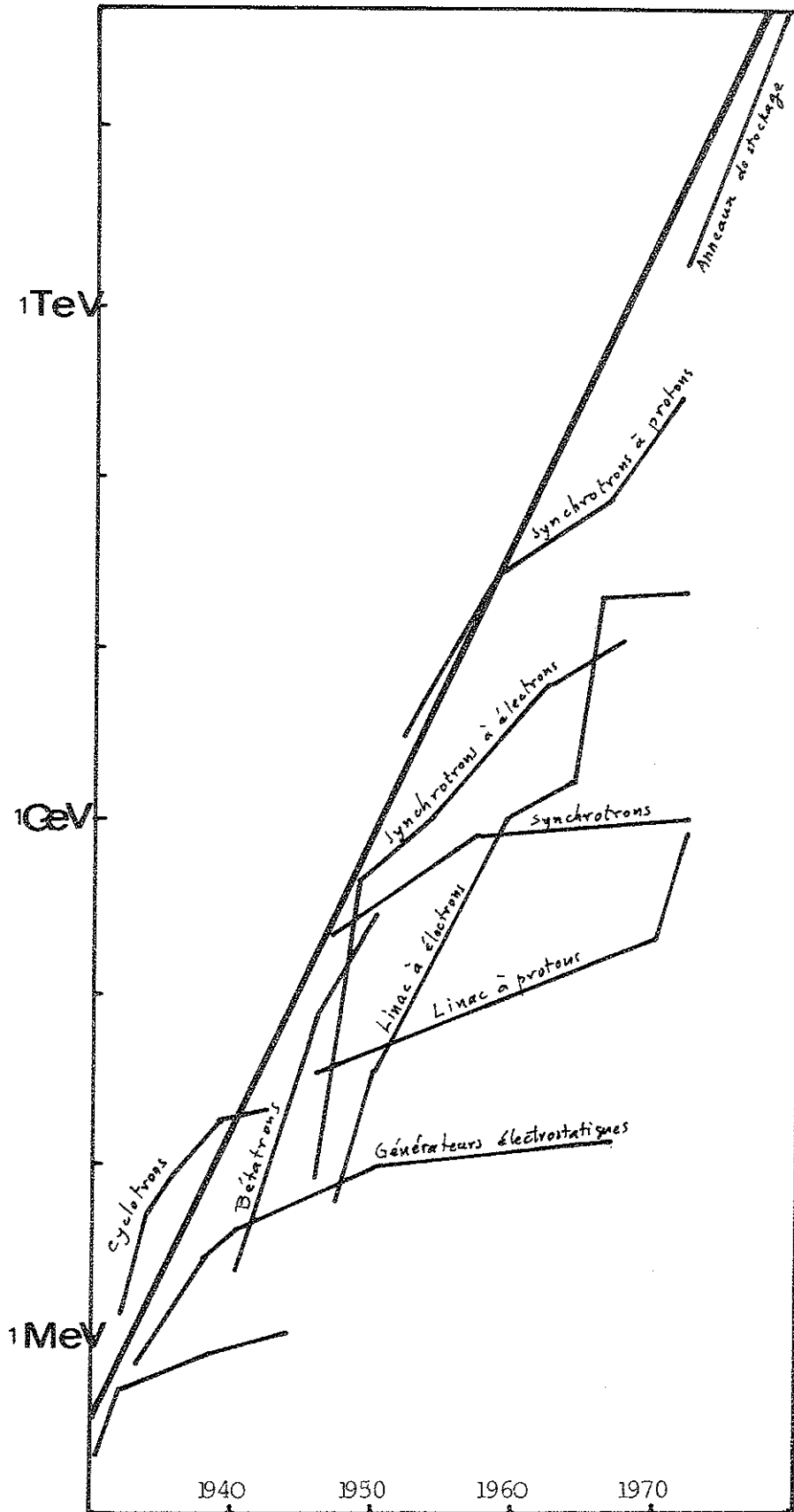


Fig. 29 La montée en énergie des accélérateurs.
(D'après Panofsky, Physics Today, Juin 1973, p.24).

porter l'énergie à plusieurs centaines de GeV, tant en Europe qu'aux Etats-Unis. La première machine de cette génération fonctionne déjà à 400 GeV au Fermi National Accelerator Laboratory à Batavia (U.S.A.), la seconde, celle du C.E.R.N., est devenue opérationnelle en 1976.

Des machines plus puissantes encore pourraient-elles être construites dans l'avenir ? La réponse à cette question ne peut être qu'affirmative ; il ne semble pas, en effet, qu'il y ait des difficultés techniques à ce sujet, si ce n'est le problème financier.

Enfin tout récemment un nouveau type de machine a fait son apparition, les anneaux de stockage à intersection, où deux faisceaux de particules circulant en sens inverses entrent en collision, ce qui offre un grand avantage par rapport aux accélérateurs déjà mentionnés du point de vue de l'énergie disponible. En effet, dans un choc d'un proton de 600 GeV contre un proton au repos, l'énergie dans le centre de masse n'est que de 33,58 GeV (dont 31,6 GeV sont disponibles après soustraction des masses au repos) ; par contre le choc de deux protons de 60 GeV chacun correspond à une énergie de 1900 GeV pour un accélérateur conventionnel.*

L'avantage des anneaux de collision du point de vue énergétique est donc considérable.

Les anneaux de collision du C.E.R.N. (I.S.R.) sont déjà en fonctionnement avec les protons du P.S. de 28 GeV, ainsi que plusieurs anneaux à électrons ou électrons-positrons ; les soviétiques étudient actuellement la possibilité de conversion de l'accélérateur de Serpukhov en anneaux de collision p-p, ainsi que des anneaux à collisions multiples (p, \bar{p} , e^+ , e^-) (266). De nombreux autres projets sont à l'étude ou en voie de réalisation dans différents pays ; ils conditionneront la physique des particules d'ici à la fin du siècle.

Pour donner une idée de l'intérêt que les physiciens accordent à ces problèmes, il suffit de rappeler que le IX Conférence Internationale sur les Accélérateurs, tenue à Stanford en Mai 1974, ne réunissait pas moins de 300 spécialistes.

II. LES FAISCEAUX DE PARTICULES

Les nouvelles machines sont capables de produire des particules chargées de grande énergie, principalement des protons, des deutons et des électrons, qu'il s'agit d'utiliser par la suite pour provoquer les phénomènes à étudier. Dans ce but le faisceau accéléré est dirigé sur une cible placée à l'intérieur de la machine et constituée d'un matériau léger (polyéthylène, Be, Li, C, Al, etc) ou lourd (Cu, W, U, etc), ou bien le faisceau est éjecté de la machine et focalisé sur une cible externe. En frappant sur ces cibles, le faisceau primaire donne naissance à toute une variété de particules (pions, kaons, nucléons, hypérons, etc, ainsi que leurs antiparticules) en quantités plus ou moins importantes, dont il s'agit d'étudier le comportement, quand ils entrent en interaction avec la matière, sous forme d'une nouvelle cible pouvant se trouver à une distance variable de la cible productrice des particules.

Pour amener les particules jusqu'au point où elles doivent entrer en interaction, il a été développé toute une optique des faisceaux à l'aide de lentilles magnétiques et d'ensembles d'aimants tellement perfectionnée qu'elle n'a rien à envier à l'optique ordinaire ; il est ainsi possible de traiter un faisceau de particules avec autant de facilité qu'un faisceau lumineux. Il est même possible d'effectuer une séparation des particules d'un faisceau complexe, par action d'un champ électrique, par absorption sélective, etc, ou encore de construire des faisceaux polarisés.

Ce sont ces faisceaux secondaires (séparés ou non) qui sont ensuite dirigés sur la cible finale (hydrogène ou deuterium liquide, mélanges d'hydrogène et de gaz rares, propane, liquides organiques lourds) pour y provoquer les phénomènes à étudier. Cette étude nécessite de son côté des mesures précises de plusieurs quantités géométriques et cinématiques (angles, directions, impulsions...) sur les particules sortantes, pour leur identification ultérieure qui, à son tour, servira à reconstruire le processus responsable de cette interaction. D'où la nécessité de détecteurs des particules.

III. LES DETECTEURS

Autour des années 1950, il y avait deux techniques principales de détection des particules, les émulsions photographiques et les chambres de Wilson qui servaient en même temps de cible et de détecteur, auxquelles il

il faudrait joindre la technique des compteurs du type Geiger-Müller, servant uniquement à la détection. Le développement des accélérateurs a entraîné une modification profonde de ces techniques. Les émulsions photographiques sont toujours utilisées (mais à une échelle plus restreinte), tandis que la chambre de Wilson a presque complètement été détrônée par les chambres à bulles, dont l'invention remonte à 1953⁽²⁶⁷⁾. Une chambre à bulles est en quelque sorte une chambre de Wilson en milieu liquide ; une particule chargée traversant ce liquide surchauffé provoque une ébullition locale le long de la trace suivie par la particule, avec formation de petites bulles de vapeur, que l'on photographie après un retard convenable (avant que les bulles n'aient trop grossi ou diffusé loin de leur point de formation). Une chambre à bulles à hydrogène ou à deutérium liquide est un mauvais détecteur des photons, car la longueur de matérialisation de ceux-ci est trop grande par rapport à la longueur de liquide traversé, mais en utilisant des liquides plus lourds (de densité élevée), comme les mélanges fréon-propane et d'autres, il est facile d'avoir une bonne probabilité de détection des photons. Il est vrai que, dans ce dernier cas, les mesures sur les électrons de matérialisation deviennent plus délicates, à cause du phénomène de diffusion multiple.

Depuis la construction de la première chambre à bulles de Glaser qui avait un volume de 3cm^3 , des progrès considérables de la technique de construction ont été accomplis, et il est possible actuellement de construire des chambres de plus de 10m^3 , qui sont de véritables usines. Ces chambres sont placées dans des champs magnétiques intenses, qui pourraient atteindre 100 kilogauss, si les bobines supraconductrices s'avèrent satisfaisantes. La courbure des traces des particules est alors une mesure de l'impulsion. On obtient de la sorte plusieurs clichés par seconde d'une excellente qualité, qu'il s'agit d'analyser par la suite.

Une autre technique qui a connu une expansion rapide, est celle des chambres à étincelles, constituées d'une série de feuilles métalliques parallèles, dont une sur deux est portée à un potentiel élevé, l'autre étant reliée à la masse ; le tout est enfermé dans un récipient étanche, rempli d'un mélange d'hélium et de néon. L'ionisation produite par le passage d'une particule provoque la formation de paires d'ions, rendus visibles par une décharge électrique le long de la trace, obtenue par application d'un champ électrique.

De dimensions modestes au début, ces chambres atteignent actuellement plusieurs m^2 ; elles peuvent être déclenchées par des compteurs en coïn-

cidence, placés en avant et en arrière de la chambre.

Les chambres à cristal constituent une extension à trois dimensions des chambres précédentes ; elles sont réalisées par un empilement d'un grand nombre de plans de fils métalliques : d'autres variétés de chambres sont les chambres à dards, ainsi nommées à cause de la forme prise par la décharge d'une impulsion électrique brève, avant que le régime d'étincelle soit atteint, ainsi que les chambres proportionnelles multifils, dérivant du compteur proportionnel à fil axial.

La technique des compteurs a aussi enregistré des progrès considérables avec le développement des compteurs à scintillations dont les dimensions varient dans une gamme très large, depuis quelques mm^2 à plusieurs m^2 . Le développement concomitant des photomultiplicateurs a permis des performances spectaculaires dans la détection des photons.

Une des réalisations les plus remarquables et les plus utiles dans le domaine des compteurs est l'invention des compteurs Cerenkov, basés sur les propriétés remarquables de la lumière émise par un milieu transparent traversé par une particule chargée qui s'y propage avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu. Cette lumière, émise dans un cône d'angle $\cos \theta = 1/n\beta$ (n = indice de réfraction du milieu, $\beta = \frac{v}{c}$, v = vitesse de la particule, c = vitesse de la lumière dans le vide) est détectée à l'aide d'un photomultiplicateur. Cette technique offre la méthode la plus précise de mesure des vitesses des particules ; sous la forme différentielle elle constitue un outil précieux pour la discrimination entre particules de masse différente.

IV. LES TECHNIQUES DES MESURES

Les méthodes de mesure des différentes sortes de clichés pris par les différents détecteurs a aussi subi une grande évolution depuis les méthodes artisanales employées pour les événements obtenus par le rayonnement cosmique. Il s'agissait maintenant de traiter dans un temps minimum non plus quelques événements par mois, mais des milliers d'événements par jour, en faire la reconstruction dans l'espace (mesures des coordonnées et des angles), les calculs cinématiques, l'ajustement analytique, la recherche systématique des différents processus responsables, le calcul de plusieurs paramètres utiles à l'interprétation des événements, etc.

Heureusement la rapide ascension des ordinateurs est venue à temps

pour faciliter ce travail, autrement impossible dans un délai raisonnable, du traitement rapide des données expérimentales, dont l'acquisition a aussi nécessité l'invention d'appareils automatiques ou semi-automatiques de dépouillement et de mesure. Des progrès constants sont réalisés chaque jour dans ces différents domaines au fur et à mesure des besoins.

L'ensemble des sujets de ce chapitre est beaucoup trop technique pour que l'on puisse s'étendre davantage et la bibliographie accumulée rien que pendant la dernière décade est absolument énorme.

Pour donner une idée de l'effort financier sur le plan technique, nous alignons quelques chiffres pour l'année 1973 : le budget annuel des Etats Units par laboratoire étaient les suivants :

Accélérateur de Cambridge	2,2 millions de \$			
Laboratoire de Brookhaven.....	27,7	"	"	"
Laboratoire d'Argonne.....	15,35	"	"	"
Bévatron de Berkeley.....	15,20	"	"	"
Laboratoire de Stanford.....	25,20	"	"	"
Laboratoire F.N.A.L.....	19,20	"	"	"
	<hr/>			
Total	101,85	"	"	"

Le coût de l'accélérateur de F.N.A.L. est estimé à 250 millions de dollars et celui des anneaux de stockage à intersection de Brookhaven (ISABELLE) à 150 millions de dollars.

Le budget 1973 des laboratoires du C.E.R.N. était de 571 millions de francs suisses et le coût des anneaux de stockage (ISR) s'élève à 500 millions de francs suisses.

Un laboratoire national comme le Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies de l'Ecole Polytechnique, disposait pour cette même année d'un budget d'environ 6 millions de francs français, dont plus d'un million pour les équipements.

V - PROBLEMES ET PARADOXES

La découverte en peu de temps de nombreux kaons et hypérons a créé en physique des particules une situation toute nouvelle et très analogue à celle qui régnait un siècle auparavant en chimie à propos des éléments chimiques. Le besoin d'une classification des particules se faisait de plus en plus sentir, mais aucun élément pouvant guider vers une telle classification ne semblait s'imposer d'une manière évidente. D'autre part, les nouvelles particules manifestaient un certain nombre de propriétés bien étranges et difficilement conciliables entre elles : leur fréquence montrait qu'elles sont produites en abondance (donc avec une grande section efficace) dans les chocs nucléon-nucléon ou pion-nucléon, mais leur vie moyenne ($> 10^{-10}$ s) était beaucoup trop longue par rapport au "temps nucléaire" de 10^{-23} s, qu'une particule relativiste met pour traverser un noyau. En second lieu, il semblait bien qu'une certaine asymétrie existait entre les différentes particules V neutres et chargées, les premières étant plus abondantes que les secondes. De plus, dans quelques cas isolés, deux particules V semblaient provenir d'une même interaction^(267,268), sans que l'on puisse les identifier avec certitude. Enfin d'autres difficultés se présentaient à propos des particules θ et τ sur lesquelles nous reviendrons.

V.1 - PRODUCTION ASSOCIEE ET HIERARCHIE DES INTERACTIONS.

Devant cette situation et dès 1951, plusieurs théoriciens^(269,273) ont émis l'hypothèse pour laquelle M.G.K. Menon a proposé le nom évocateur de production associée⁽²⁴⁰⁾. D'après Pais⁽²⁷³⁾ il devait y avoir deux sortes de particules V (chargées ou neutres), d'une part les fermions lourds (plus lourds que le nucléon) et d'autre part les bosons. Les fermions devraient de plus obéir à la règle, généralisée par Oppenheimer⁽²⁷⁴⁾, de la conservation du nombre baryonique (nombre des baryons moins nombre des antibaryons), et cela malgré "l'absence spectaculaire de l'antiproton" qui n'avait pas encore été détecté.

Malgré l'absence de tout événement certain de production de paires de particules V, Pais n'a pas hésité à suggérer que :

1/ Les particules V sont produites par paires avec une autre particule lourde instable et 2/ les couplages entre les différentes particules connues sont de deux types, fort et faible, le premier étant responsable de la production abondante des particules V et le second rendant compte de la désintégration lente de ces particules.

Comme cet auteur l'exprime, "la possibilité de production en paires des particules V, est difficile à exclure par les expériences existantes", et il conclut " il y a des indications en faveur de l'existence de familles de particules élémentaires, dont les membres peuvent se distinguer par un processus de quantification, mais un processus nouveau". Notons que dans ce même article Pais mettait aussi l'accent sur la similitude entre l'électron et le muon.

L'hypothèse de la production associée était loin d'être évidente en 1951 et le Congrès de Bagnères de 1953⁽¹⁶⁷⁾ manifestait encore son scepticisme* ; mais elle n'a pas tardé à enregistrer une éclatante confirmation. Le premier exemple de production associée vint de Brookhaven⁽²⁴²⁾ et bien d'autres ont suivi rapidement⁽²⁷⁶⁻²⁸⁵⁾.

Il était donc devenu nécessaire d'établir une hiérarchie des interactions en distinguant quatre sortes⁽²⁴⁰⁾ :

1/ L'interaction forte, responsable des forces nucléaires, qui maintient ensemble les nucléons dans les noyaux et qui par conséquent assure la stabilité de la matière; d'un rayon d'action très limité (de l'ordre de 10^{-13} cm), mais d'une très grande intensité, elle régit les phénomènes ayant lieu dans les collisions des particules qui y participent (pions, kaons, nucléons, hypérons) que l'on appelle, suivant une heureuse nomenclature introduite par L. Okun, hadrons.

Cette interaction peut être caractérisée par une constante de couplage entre ces particules de l'ordre de $g^2/4\pi \approx 15$.

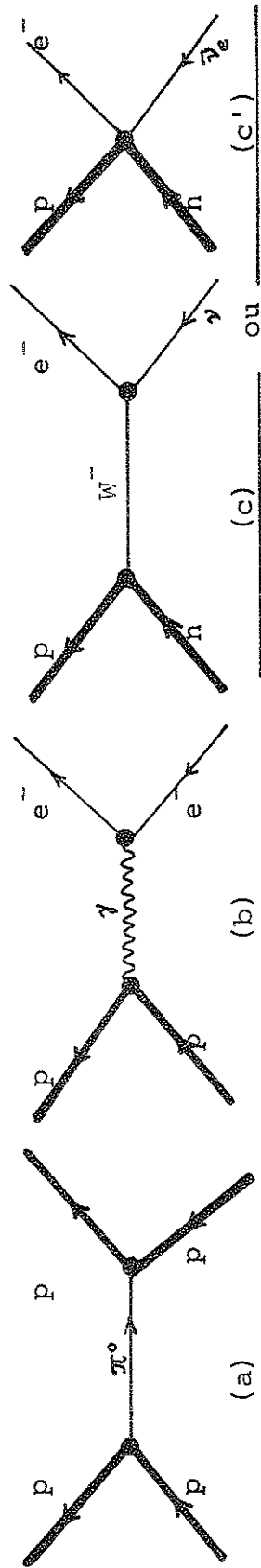


Fig. 30 Trois sortes d'interactions/trois couplages:

- a) Interaction forte (diffusion p-p par l'intermédiaire d'un pion neutre.
- b) Interaction électromagnétique (diffusion e-p) par l'intermédiaire d'un photon.
- c) Interaction faible (désintégration du neutron) par l'intermédiaire d'un boson intermédiaire W^- , ou bien
- c') par interaction ponctuelle (Fermi).

Les nucléons et les hyperons ainsi que les autres particules lourdes ont reçu le nom collectif de baryons (Pais et Gell-Mann)⁽²⁸⁶⁾, et on leur assigne un nombre baryonique de +1; leurs antiparticules portent un nombre baryonique de -1. Par extension de la loi de la conservation des nucléons, Oppenheimer⁽²⁷⁴⁾ a introduit la loi plus générale de la conservation du nombre baryonique dans tous les processus entre particules.

La force nucléaire (forte) est la force la plus intense que l'on connaisse dans la nature; elle rend compte d'une foule de phénomènes.

2/ L'interaction électromagnétique (constante $\alpha = e^2/4\pi$), environ 10^3 fois plus faible que la précédente, régit la grande classe des phénomènes électromagnétiques et agit sur toutes les particules possédant une charge électrique. Responsable des liaisons entre atomes et molécules, elle décroît suivant la loi de Coulomb (en $1/r^2$); cette interaction se transmet par l'intermédiaire d'une particule neutre, le photon, porteuse du champ électromagnétique. C'est la force qui se manifeste dans la quasi-totalité des phénomènes chimiques et biologiques, mais joue aussi un grand rôle en physique des particules. La théorie moderne de l'Electrodynamique Quantique, est une des théories les plus élégantes et les plus précises de la physique, vérifiée avec une remarquable précision.

3/ L'interaction faible, d'une portée inférieure à 10^{-14} cm et peut être même ponctuelle, est de $(G_m^2)_p^2/4\pi = 10^{-11}$ fois plus faible que l'interaction forte. Elle régit les phénomènes de radioactivité bêta et la désintégration de toutes les particules à interaction forte (à quelques exceptions près) et elle est partagée par des particules complètement insensibles à l'interaction forte, nommés leptons* et porteurs d'un nombre leptonique; ce sont les électrons, les muons et les neutrinos. Ces derniers ne participent d'ailleurs à aucune des interactions précédentes; ils ne sont sensibles qu'à l'interaction faible.

Par analogie avec les autres interactions, les théoriciens ont introduit une particule qui serait le porteur de la force faible, le boson intermédiaire W, particule qui jusqu'à présent a défié tous les efforts des expérimentateurs pour la mettre en évidence; elle reste donc

jusqu'à nouvel ordre hypothétique.

4/ L'interaction gravitationnelle, responsable de la stabilité de l'univers, qui remonte à Newton(1666), est proportionnelle à la masse et inversement proportionnelle au carré de la distance et elle est 10^{-39} fois plus faible que l'interaction forte. Ses effets au niveau subatomique sont donc négligeables, si toutefois on arrivait à les mettre en évidence. On peut, semble-t-il, l'expliquer en termes de gravitons, particules de masse nulle et de spin 2, pouvant se propager à la vitesse de la lumière, mais dont la détection semble en dehors des limites de l'expérimentation actuelle.

Il est clair que ces quatre genres d'interaction ne sont pas exclusifs, un proton, par exemple, pouvant participer aussi bien à l'interaction forte qu'à l'interaction électromagnétique, faible et la gravitation. Seul le neutrino ne participe qu'à l'interaction faible; d'où son grand intérêt pour l'étude de cette interaction qui est actuellement au centre des préoccupations aussi bien des expérimentateurs que des théoriciens. Mais il n'échappe pas à la gravitation.

A chacune des trois interactions qui nous intéressent ici, forte, électromagnétique et faible, on peut attacher un temps d'interaction de l'ordre de 10^{-23} , 10^{-20} et 10^{-11} s respectivement.

Cette classification un peu brutale des interactions en catégories, n'est peut-être qu'à la mesure de notre ignorance des forces qui se manifestent dans la nature, et de nombreux théoriciens fournissent pendant ces dernières années des efforts soutenus en vue d'une description de tous les phénomènes à l'aide d'une théorie unique. Des progrès considérables sont déjà enregistrés pour les interactions faibles et électromagnétiques et il semble que dans un avenir proche, l'espoir de Gell-Mann de voir toutes les interactions rentrer dans un cadre unique pourrait être réalisé.

V.2 - LE COMPLEXE $K^0 - \bar{K}^0$. L'OPERATION DE CONJUGAISON DE CHARGE.

La découverte des particules V^0 a soulevé de nombreux problèmes qu'il n'est pas possible de traiter ici dans tous les détails.

On se contentera donc de souligner quelques difficultés à propos des particules K neutres. Comme nous l'avons vu, il semblait exister des K^0 de vie moyenne courte (de l'ordre de 10^{-10} s), se désintégrant en deux pions, et d'autres, appelés anormaux, et se désintégrant en trois ou plusieurs particules et dont la vie moyenne n'était pas bien déterminée.

En 1953, Gell-Mann, en postulant le principe de l'invariance par l'opération de conjugaison de charge, qui transforme une particule en son antiparticule, suggéra une possibilité intéressante pour le cas des particules neutres, suivant laquelle l'antiparticule peut être différente de la particule. Ceci est nécessairement vrai pour les fermions neutres (le neutron est nécessairement différent de l'antineutron), mais la question se présente différemment pour les bosons neutres : le pion neutre et le photon sont apparemment identiques à leurs antiparticules, mais il n'y a aucune raison de supposer que cette règle est générale; il est possible qu'il existe des bosons neutres qui sont différents de leurs antiparticules. Tel serait, par exemple, le cas pour les K^0 ⁽²⁸⁷⁾. Dans une discussion, Fermi a répondu à Gell-Mann qu'il "serait prêt de croire à cette possibilité, s'il y avait un moyen pour distinguer entre le K^0 et son antiparticule \bar{K}^0 ".

La question a été reprise par Gell-Mann et Pais⁽²²⁶⁾ qui ont pu préciser que, si la non-identité entre particule et antiparticule est garantie pour les baryons par la loi de conservation du nombre baryonique, il n'y a a priori aucune raison pour exclure l'existence d'antibosons différents des bosons correspondants, puisque dans ce cas, il n'y a pas de loi d'interdiction analogue à celle des baryons.

Si donc la désintégration

$$K^0 = \pi^+ + \pi^- \quad (V.1)$$

procède par l'intermédiaire de l'interaction faible, en absence de loi d'interdiction inhibitrice, le processus conjugué de charge :

$$\bar{K}^0 = \pi^+ + \pi^- \quad (V.2)$$

doit être aussi possible, du moins en tant que processus virtuel, et doit conduire à un état des deux pions de même moment angulaire relatif et avec la même valeur du nombre quantique de conjugaison de charge $C = (-1)^L$, avec $L = J = \text{spin du } K^0 = 0$.

L'interaction faible est donc capable d'induire des transitions virtuelles du type :

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \rightarrow \bar{K}^0 \quad (V.3)$$

qui ne sont pas possibles dans le cas du neutron-antineutron.

A la production (interaction forte) on a donc les objets primaires K^0 et \bar{K}^0 , mais la désintégration est mieux décrite à l'aide de deux nouveaux états K_1^0 et K_2^0 , définis de la manière suivante :

$$|K_1^0\rangle = (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (V.4)$$

$$|K_2^0\rangle = (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (V.5)$$

Ces deux nouveaux états sont des états propres de l'opérateur C , avec la valeur propre $+1$ et -1 respectivement, et conduisent à des schémas de désintégration différents pour K_1^0 et K_2^0 , qui sont les vraies particules (en ce qui concerne la désintégration) ayant des vies moyennes différentes et éventuellement des masses différentes. En particulier, seul le K_1^0 peut se désintégrer en deux pions de même valeur de $C = +1$; cette voie est interdite au K_2^0 de $C = -1$, mais ce dernier peut se désintégrer suivant d'autres modes, comme, par exemple, 3π , $2\pi + \gamma$, $\pi e \nu$, etc.

Ainsi ce ne sont pas les particules K^0 et \bar{K}^0 (elles n'ont pas une vie moyenne unique), mais des mélanges (superpositions d'états) de K_1^0 et K_2^0 qui sont les vraies particules, avec des vies moyennes différentes. Seulement la moitié des K^0 (mais pas plus) peut se désintégrer en deux pions.

Il est à remarquer, qu'au moment où cette hypothèse avait été formulée, on ne connaissait que quelques K^0 anormaux; il était tentant de les attribuer au K_2^0 , une hypothèse qui a été confirmée par la suite, dans une expérience du groupe Columbia-Brookhaven⁽²²⁷⁾, par l'observation de $26K^0$ qui se désintégraient autrement qu'en deux pions. Une expérience en chambre à bulles à propane⁽²⁴⁵⁾ a montré que 49% de tous les K^0 produits par la réaction :



se désintègrent en deux pions et aucun K_2^0 n'était vu. Le même groupe⁽²⁴⁶⁾ a trouvé un K_2^0 , se désintégrant à une distance correspondant à 10 vies moyennes du K^0 . Enfin d'autres confirmations indépendantes ont suivi rapidement^(252, 288, 289).

Une expérience cruciale pour la théorie de Gell-Mann et Pais, a été proposée par Pais et Piccioni⁽²⁹⁰⁾; c'est le phénomène de régénération des K_1^0 à partir d'un faisceau de K_2^0 :

V.3 - LE PHENOMENE DE REGENERATION.

Imaginons l'expérience suivante (fig. 31) : dans une chambre à bulles contenant deux écrans A et B assez éloignés l'un de l'autre et, A étant beaucoup plus mince que B, faisons arriver sur A un faisceau de pions pouvant produire des K^0 par la réaction (V.6); suivons la propagation de ces K^0 dans la direction perpendiculaire au faisceau dans une chambre à bulles. Si la théorie de Gell-Mann-Pais est correcte, ces K^0 sont un mélange à 50% de K_1^0 de vie moyenne courte, $\tau_1 = 10^{-10}$ s et de K_2^0 de vie moyenne $\tau_2 \gg \tau_1$; les K_1^0 se désintégreront au bout de quelques centimètres en deux

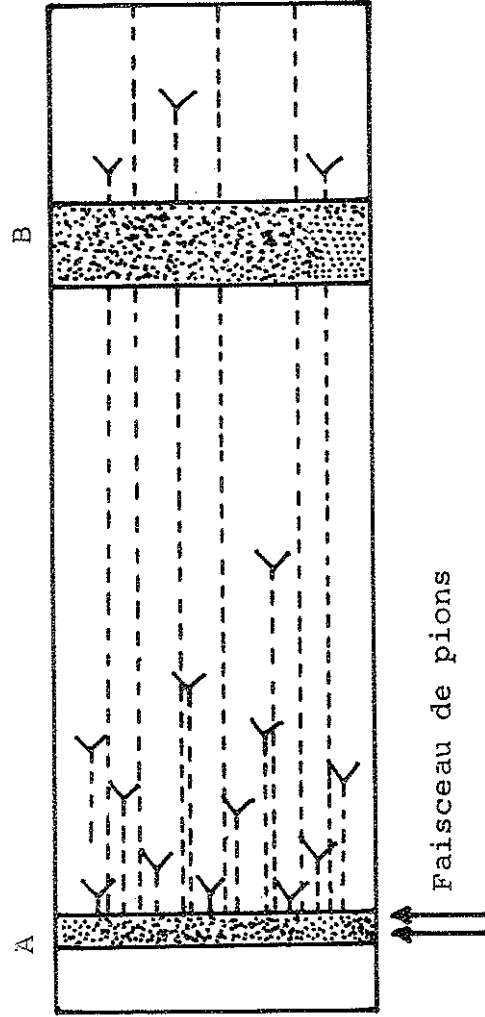


Fig.31 Une expérience (fictive) proposée par Pais et Piccioni: Les K^0 produits dans l'écran A sont détectés à 90° des pions incidents. Les K_1^0 se désintègreraient rapidement en deux pions et seuls les K_2^0 arriveraient sur l'écran B, derrière lequel apparaîtrait le 1/4 des désintégrations en deux pions observées derrière l'écran A.

pions, avec une vie moyenne non unique (car tous les K^0 initiaux n'ont pas la même énergie) et, si l'écran B est placé à une distance convenable de A, seuls les K_2^0 y parviendront, mais sous forme d'un mélange à 50% de K^0 et de \bar{K}^0 . Supposons pour plus de simplicité que l'écran B soit capable d'absorber toute la composante \bar{K}^0 et de laisser passer (avec une légère atténuation) la composante K^0 , qui sera de nouveau un mélange à 50% de K_1^0 et K_2^0 . On verra donc de l'autre côté de l'écran des désintégrations en deux pions dues à cette composante K_1^0 en nombre correspondant au 1/4 de celles observées dans la région entre les deux écrans A et B.

L'expérience Pais-Piccioni n'a été réalisée qu'en 1960⁽²⁹¹⁾ et elle a pleinement confirmé les prévisions théoriques. Cette régénération par transmission n'est d'ailleurs pas la seule possible; elle peut aussi avoir lieu par diffraction, à cause des amplitudes différentes de la diffraction des K^0 et \bar{K}^0 , dont l'onde diffractée doit contenir des K_1^0 et des K_2^0 , ainsi que par interaction cohérente avec les nucléons individuels⁽²⁹¹⁾.

Une autre conséquence importante de la théorie de Gell-Mann et Pais est la curieuse évolution avec le temps d'un faisceau pur de K^0 , qui dépend d'une manière très sensible de la vie moyenne du K_1^0 et de la différence de masse $K_1^0 - K_2^0$, ce qui permet d'attendre cette dernière, malgré sa valeur extrêmement faible. La fig. 32 montre la probabilité de trouver un K^0 (ou un \bar{K}^0) dans un faisceau initialement pur de K^0 , en fonction du temps et de la différence de masse $\Delta m = m_{K_2^0} - m_{K_1^0}$. Des expériences très précises, qu'il n'est pas possible de détailler ici, ont donné la valeur :

$$\Delta m = (0.5403 \pm 0,035) 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

soit environ $3.8 \cdot 10^{-6}$ eV.

On trouvera un exposé détaillé de tous ces problèmes dans la référence⁽²⁹²⁾.

Le cas des kaons neutres constitue un autre exemple d'un des paradoxes de la mécanique quantique connu depuis longtemps sous le nom du

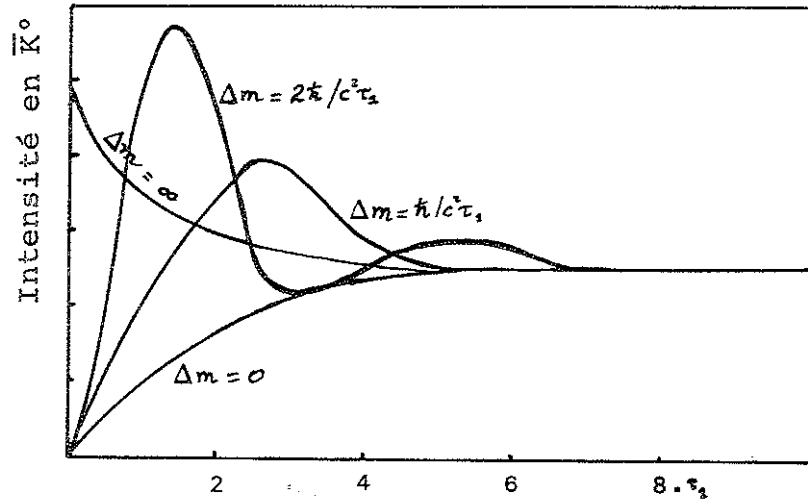


Fig. 32 Evolution avec le temps de l'intensité d'un faisceau de K^0 pour différentes valeurs de la différence de masse $K^0 - \bar{K}^0$ (Phys.Rev., 128, 362, 1962).

Paradoxe de Rosen-Podolsky-Einstein. Considérons, par exemple, la situation suivante : une particule non étrange de parité négative se désintégrant en deux kaons neutres émis dans des directions opposées $+z$ et $-z$ dans le référentiel de la particule au repos ⁽²⁹³⁾, et regardons simultanément les deux kaons neutres produits : si l'on s'attache à leur interaction avec la matière (interaction forte) on constate que si l'un de deux kaons est un K^0 , l'autre est forcément un \bar{K}^0 . En aucun cas on ne pourra voir $2K^0$ ou $2\bar{K}^0$. Si l'on s'attache à leur désintégration (interaction faible) et si le kaon émis dans la direction $+z$ est un K_1^0 , celui émis dans la direction $-z$ est forcément un K_2^0 ; on ne verra jamais $2K_1^0$ ou $2K_2^0$. La mesure effectuée sur l'un des kaons fournit une information sur l'autre !!

Si maintenant on combine les deux mesures précédentes, il n'est plus possible de dire dans quel état se trouve le kaon observé; tous ceux émis dans la direction $+z$ sont dans un état K_1^0 ou K_2^0 , suivant le type de mesure effectuée, ou bien dans un état K^0 ou \bar{K}^0 . En ce qui concerne la désintégration, le kaon émis dans la direction $-z$ sera un K_1^0 ou un K_2^0 ; celui émis dans la direction $+z$ sera un K_2^0 ou un K_1^0 respectivement, mais pas l'inverse. En ce qui concerne l'interaction avec la matière, le premier ($-z$) sera un K^0 ou un \bar{K}^0 et le second ($+z$) un \bar{K}^0 ou un K^0 respectivement, mais pas l'inverse. Le processus de la mesure oblige pour ainsi dire l'un des kaons à se manifester en tant que K^0 ou \bar{K}^0 (voir en tant que K_1^0 ou K_2^0), mais en même temps affecte l'autre, qui peut se trouver à une grande distance du premier. Comme dans le cas des trous de Young, il y a interférence constructive pour l'amplitude $K_1^0 K_2^0$ et interférence destructive pour les amplitudes $K_1^0 K_1^0$ et $K_2^0 K_2^0$.

Les kaons neutres, aussi bien que les chargés, ont suscité bien d'autres problèmes, qui ont fait l'objet de nombreuses recherches pendant plusieurs années, et sur lesquels il n'est pas possible d'insister ici; on trouvera une vue d'ensemble dans la réf. 292 .

V.4 - LE SPIN ISOTOPIQUE ET L'HYPOTHESE DE L'INDEPENDANCE PAR RAPPORT A LA CHARGE DES FORCES NUCLEAIRES.

Nous avons déjà vu qu'aussitôt après la découverte du neutron, Heisenberg a jugé commode d'introduire, dans l'élaboration de sa théorie de la structure de l'atome, en plus des trois coordonnées d'espace et du spin, une cinquième variable, le "p-Spin", actuellement notée $\vec{\tau}(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$, avec :

$$2\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad 2\tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad 2\tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (V.7)$$

D'après la nouvelle terminologie introduite par E. Wigner on l'appelle spin-isotopique, une dénomination qui a prévalu à celle plus correcte de spin-isobarique.

Ce nouvel opérateur $\vec{\tau}$ agit dans un espace abstrait, l'isoespace ou espace des charges, mais le formalisme correspondant est exactement analogue à celui du spin ordinaire; en particulier les valeurs propres de sa troisième composante τ_3 caractérisent les états de charge du nucléon, la valeur +1 correspondant au proton et la valeur -1 au neutron (Heisenberg avait adopté la convention inverse). La charge électrique du nucléon est donnée par l'opérateur de charge :

$$Q = 1/2 + \tau_3 \quad (V.8)$$

qui donne, comme il se doit, la valeur $Q = +1$ pour le proton et la valeur $Q = 0$ pour le neutron.

Le nucléon peut donc être considéré comme un isospineur de composantes :

$$p = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad n = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (V.9)$$

avec l'isospin vers le haut pour l'état proton et vers le bas pour l'état neutron. L'opérateur $2\tau_1$ transforme un proton en neutron et vice-versa.

Ce nouvel opérateur, correspondant à un nouveau bon nombre quantique, l'isospin, dont la valeur pour le nucléon est $1/2$ avec une multiplicité 2, soit $+1/2$ (proton) et $-1/2$ (neutron), s'est avéré d'une importance capitale dans le développement de la physique nucléaire, à une époque, il faudrait le rappeler, où il n'existait que deux particules élémentaires dans le noyau, le proton et le neutron qui venait à peine d'être découvert. Fermi l'a utilisé dans sa théorie de la radioactivité β ainsi que Konopinski et Uhlenbeck⁽²⁹⁴⁾ et Yukawa dans sa théorie mésique des forces nucléaires, Bethe et Bacher⁽²⁹⁵⁾, Sachs⁽²⁹⁶⁾, etc. Dans un important travail Cassen et Condon⁽²⁹⁷⁾ l'utilisent, sous le nom de "vecteur de caractère" (character vector), pour donner des expressions des différentes forces nucléaires (Heisenberg, Majorana, Bartlett, Coulomb) et pour la classification des états du deuteron. Dans l'hypothèse de Heisenberg seule la force p-n joue un rôle important, mais dans celle de Majorana interviennent aussi des forces n-n et p-p, afin d'assurer la stabilité des noyaux. Bien entendu on ne possédait en ce moment (1932-1935) que très peu de données expérimentales, d'ailleurs peu précises, sur les forces nucléaires, mais malgré cela Young⁽²⁹⁸⁾ signalait déjà que des forces p-p et n-n sont indispensables pour assurer la stabilité des noyaux et que les liaisons entre les particules du noyau sont les mêmes "without regard to the kind of interacting particles". De même, en résumant la situation du point de vue expérimental, Bethe et Bacher⁽²⁹⁵⁾ interprètent la relation entre masse atomique et charge nucléaire des noyaux légers (C^{12} , N^{14} , O^{16} , etc) par des forces attractives n-n et p-p exactement égales, aux effets de Coulomb près. Les premières expériences assez précises sur la diffusion p-p (à moins de 0.9 MeV) furent analysées par Breit, Condon et Present⁽²⁹⁹⁾ avec la conclusion que la force p-p, après soustraction de la contribution coulombienne, s'avère être égale à celle p-n.

La grande difficulté de l'étude de la diffusion n-n avait été heureusement contournée par l'étude des noyaux miroirs ($H^3 - He^3$, $C^{14} - N^{14} - O^{14}$) qui avaient la même énergie de liaison, ce qui était en faveur des forces p-p égales à celles n-n et confirmait l'hypothèse de Young de l'indépendance de ces forces de la charge des particules. Breit et Feenberg suggérèrent donc de nouveau⁽³⁰⁰⁾ une force universelle de l'interaction pour

toutes les particules nucléaires, suivis par Gamow et Teller⁽³⁰¹⁾ et Oppenheimer et Serber⁽³⁰²⁾.

Ainsi le formalisme du spin isotopique était bien élaboré dès 1932 par Heisenberg en ce qui concerne les nucléons, seules particules nucléaires connues à l'époque.

Or, la première théorie de Yukawa à mésons chargés (qui, tout comme celle de Fermi, visait à expliquer non seulement les forces nucléaires, mais aussi la radioactivité β) ne pouvait pas rendre compte des forces p-p et n-n et, partant, de leur indépendance par rapport à la charge. Pour sortir de cette impasse, Yukawa et ses collaborateurs d'une part⁽³⁰³⁾ et d'autre part, et indépendamment, Kemmer et ses collaborateurs⁽³⁰⁴⁾, ont proposé l'existence d'un méson neutre, mais c'est finalement Kemmer⁽³⁰⁵⁾ qui a formulé l'hypothèse de l'indépendance par rapport à la charge (CI-hypothesis), en introduisant trois champs mésiques, membres d'un triplet de spin isotopique 1 et de charges +1, 0, -1, couplés aux nucléons. Tout cela évidemment à une époque où les mésons n'existaient que dans la tête des théoriciens, dont plusieurs étaient d'ailleurs hostiles à l'introduction d'un méson neutre, qui ne semblait pas exister, puisque les mésotrons cosmiques étaient tous chargés.

Par extension du formalisme du spin pour les bosons, les trois composantes du spin isotopique du méson sont :

$$\tau_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (\text{V.10})$$

et l'opérateur de charge

$$Q = \tau_3 \quad (\text{V.11})$$

Pour un système de particules, nucléons et mésons par exemple, l'opérateur de charge sera :

$$Q = \sum_{\text{nucléons}} \left(\frac{1}{2} + \tau_3 \right) + \sum_{\text{mésons}} \tau_3 = I_3 + \frac{B}{2} \quad (\text{V.12})$$

où I_3 est la troisième composante du spin isotopique total I du système et B le nombre baryonique (nombre des baryons moins nombre des antibaryons), qui est nul pour les mésons.

Par un choc en retour, la découverte des mésotrons cosmiques en 1937 a beaucoup encouragé les recherches sur le développement de la théorie, mais aussitôt des graves difficultés apparurent pour la théorie mésique. En effet, les mésons devaient entrer en interaction avec les nucléons, avec une certaine constante de couplage g , mais aussi avec les électrons et les neutrinos, avec une autre constante de couplage $g' \ll g$. Un méson positif (négatif) devait se désintégrer spontanément en un positron (néga-ton) et un neutrino⁽³⁰⁶⁾ avec une vie moyenne de l'ordre de 10^{-8} s, tandis que la vie moyenne des mésotrons était de $2,0 \cdot 10^{-6}$ s. Plus grave encore, il semblait bien que les mésotrons n'entraient en interaction avec la matière que très rarement, au lieu de manifester une forte interaction (grande section efficace).

C'est devant cette situation que Tanikawa et Sakata⁽³⁰⁷⁾ ont proposé dès 1942, l'hypothèse des deux mésons, dont nous avons déjà vu le développement à partir de l'année 1947.

Entre temps, à partir de 1937, commence à se manifester de plus en plus fortement la tendance à la séparation entre interactions faibles et fortes. Camp⁽³⁰⁸⁾ constate en effet que la force de Fermi s'avère trop faible pour l'interaction n-n et p-p et suggère l'abandon des tentatives de réconciliation des interactions entre particules lourdes et la radio-activité. Deux ans plus tard, Serber⁽³⁰⁹⁾ est plus explicite " One is forced to give up any theoretical connection between β -decay and mesotron decay".

C'est le divorce définitif. La théorie de Fermi devient la théorie des interactions faibles, celle de Yukawa, la théorie des interactions fortes (à couplage fort, selon Wentzel⁽³¹⁰⁾).

Sans insister davantage ici sur les nombreuses élucubrations qui se sont succédées à propos des théories mésiques, nous retiendrons un fait important, qui a vu le jour pendant cette période d'avant guerre, l'apparition de la notion d'isobare, due à Heitler⁽³¹¹⁾ et Bhabha⁽³¹²⁾. Il s'agit de l'existence postulée de particules lourdes, de charge entière positive ou négative, ayant des énergies au repos différentes et dont seuls les états les plus bas existeraient dans la nature (protons et neutrons). Bhabha concevait même que des protons de charge $+2e$ et $-e$ doivent exister dans la nature, mais sont instables vis-à-vis de la radioactivité β , et les négatifs peuvent de plus s'annihiler avec les positifs. Pour Pauli et Dancoff⁽³¹³⁾ ces "états excités du p et du n différent des états fondamentaux non seulement par la charge, mais aussi par leur spin et l'énergie de séparation (clivage des masses). On parlait alors de nucléons nus et de nucléons habillés d'un manteau mésonique et Weisskopf⁽³¹⁴⁾ a envisagé une explication de la production de mésons par le rayonnement cosmique à l'aide de nucléons excités, se désintégrant par la suite avec émission de plusieurs mésons. Comme Wentzel⁽³¹⁵⁾ le signalait, la question de l'existence ou de la non-existence de ces isobares "est de la plus haute importance, en connection avec les problèmes de self-énergie, et il est à espérer que les expériences avec les machines de haute énergie trancheront bientôt cette question". Mais à vrai dire, ces isobares n'existaient à ce moment que dans la tête des théoriciens et personne ne se doutait du déluge qui allait survenir avec la découverte des résonances, dont il sera question dans un prochain chapitre.

Après cette digression nécessaire pour montrer l'introduction de la notion de spin isotopique et son importance tant en physique nucléaire qu'en physique des particules, il nous faut maintenant montrer comment cette notion des multiplets de charge a été étendue aux nouvelles particules (kaons et hyperons). Nous suivrons pour cela le magistral exposé de Gell-Mann⁽³¹⁶⁾ qui part de la remarque simple (oh, combien!) suivante :

Si l'on croit que les nouvelles particules satisfont au principe de l'indépendance de charge et conservent le spin isotopique, il est naturel de penser qu'elles se groupent en multiplets de charge. Or, comme le montre la figure 33 les bosons ordinaires (pions) constituent un triplet de charge centré sur la valeur 0 et les nucléons un doublet centré sur la valeur $+1/2$. On pourrait donc penser que les kaons (bosons) et les hyperons (fermions) sont aussi des triplets et des doublets, respectivement centrés sur 0 et $\pm 1/2$.

Mais vers 1952, Gell-Mann⁽²⁴⁰⁾ et Nishijima⁽²⁴¹⁾ ont indépendamment conçu l'idée suivant laquelle ces particules étranges "pourraient ne pas suivre ce schéma et que les déviations attendues pourraient rendre compte de leur étrange comportement"⁽³¹⁶⁾.

Comment, en effet, savons-nous que les particules lourdes sont des doublets de spin isotopique $1/2$? Certes ces particules semblaient être apparentées aux nucléons et pour des raisons de simplicité on pouvait espérer qu'elles l'étaient effectivement. Mais si elles étaient membres de cette famille, elles étaient des membres étranges. "Peut-être c'était précisément en leur spin isotopique que résidait leur étrangeté. Si ces particules lourdes, au lieu d'être des doublets de spin isotopique $1/2$, comme les nucléons, étaient des triplets de spin isotopique 1 ou même des singulets de spin isotopique 0, et si les kaons, au lieu d'être des triplets, comme les pions, étaient des doublets ?".

Après avoir joué pendant quelque temps avec cette idée, Gell-Mann commence à s'apercevoir qu'elle pourrait justement enfermer la loi de conservation qui était nécessaire pour expliquer la production associée et la longue vie moyenne des particules étranges⁽³¹⁶⁾.

V.-5 LES MULTIPLÉTS DE CHARGE DÉPLACÉE ET LE NOUVEAU NOMBRE QUANTIQUÉ D'ÉTRANGETÉ

Pendant les années 1952-1955 plusieurs tentatives ont vu le jour, pour essayer de trouver une explication du comportement des particules étranges, soit en leur attribuant un spin isotopique élevé⁽³¹⁷⁾ ou un

Particules	Isospin	Etrangeté	Charge électrique					
			-1	-1/2	0	+1/2	+1	
Photon					○			
Neutrino					○			LEPTONS
Electron			⊗					
Muon			⊗					
Pions	1	0	⊗		○		●	BOSONS
Kaons	1/2	+1			○ →		●	
Nucléons	1/2	0			○		●	BARYONS
Lambda	0	-1			○ ←		●	
Sigmas	1	-1	⊗		○ ←		●	
Ksis	1/2	-2	⊗		○ ←			
Oméga	0	-3	⊗		○ ←			

Fig.33 Les particules stables en tant que multiplets de charge déplacée. Pour les bosons le triplet des pions a une charge centrée sur la valeur 0; le doublet des kaons est centré sur la charge +1/2. Pour les baryons le doublet des nucléons est centré sur la charge +1/2, mais les hyperons forment des singulets, des doublets et des triplets, dont le centre de charge se trouve déplacé de -1/2, -1 et -3/2 respectivement du barycentre des charges (flèches horizontales) des nucléons.

La situation se trouve naturellement inversée pour les antiparticules, qui ne sont pas portées sur la figure.

spin ordinaire élevé⁽³¹⁸⁾, soit en postulant l'existence d'un moment angulaire isotopique orbital et d'une parité isotopique⁽³¹⁹⁾, mais elles ont été jugées inacceptables et rapidement abandonnées.

Gell-Mann de son côté, dans un premier stade⁽³²⁰⁾ avait proposé un classement de ces particules en deux familles :

- a) Fermions, de spin isotopique entier (il voulait dire $1/2$)* et
- b) Bosons, de spin isotopique demi-entier.

En même temps il introduisait l'idée nouvelle suivant laquelle les bosons pourraient être différents des anti-bosons, une idée qu'il a développée par la suite avec Pais⁽²⁸⁶⁾ à propos des kaons neutres.

Mais essayons de suivre la marche de la pensée de Gell-Mann :

Supposons que parmi ces particules lourdes il existe un singulet de charge 0. Se pourrait-il, par chance, que ce soit le Λ^0 ? Si c'est le cas, le centre de ce multiplet est à 0, c'est-à-dire déplacé de $1/2$ unité de charge vers le bas du centre du doublet nucléonique (fig.33); le Λ^0 est donc déplacé de $-1/2$ unité de charge. Ce déplacement constitue peut-être le caractère physique essentiel de cette particule, qui rend compte de son étrangeté. Supposons alors que c'est effectivement le cas et inven-tions une nouvelle quantité physique et appelons-la étrangeté. Pour des raisons de commodité mathématique, posons que l'étrangeté est égale à deux fois le déplacement; ainsi l'étrangeté de notre hypothétique lambda sera de $-1/2 \times 2 = -1$, et celle de l'anti-lambda +1.

Le triplet Sigma : Essayons maintenant quelque chose d'autre, disons le triplet centré à 0. Son étrangeté serait -1. Si un tel triplet existe, il doit y avoir trois particules étranges, une positive, une négative et une neutre, toutes trois avec approximativement la même masse. Au moment où la théorie de l'étrangeté avait été conçue, on ne connaissait pas un tel triplet, mais on sait actuellement qu'il existe un triplet (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-).

Son étrangeté est -1, comme pour le Λ^0 . Le Σ^0 n'a été trouvé que bien plus tard, mais Gell-Mann n'hésita pas à postuler son existence et à prédire son mode de désintégration en $\Lambda^0 + \gamma$.

Le doublet Ksi : Une autre possibilité est celle d'un doublet de déplacement -1 et d'étrangeté -2; ce serait une paire de particules de charge -1 et 0. C'est le Ksi. Encore une fois le Ξ^0 n'était pas connu, mais "le succès général de la théorie de l'étrangeté nous rend confiants qu'il sera trouvé; le seul processus faible de sa désintégration est $\Xi^0 = \Lambda^0 + \pi^0$ " !!

Comme on ne connaissait pour le moment qu'une douzaine de $\Xi^- = \Lambda^0 + \pi^-$ et aucun $n + \bar{\pi}$, Gell-Mann postule tout simplement que ce processus n'a pas lieu. Il en découle alors une règle de sélection pour le changement d'étrangeté, quand les interactions faibles interviennent pour provoquer la désintégration d'une particule à interaction forte en d'autres particules à interaction forte, à savoir la règle :

$$\Delta S = \pm 1 \text{ ou } \Delta I_3 = \pm 1/2 \quad (V.13)$$

En somme, "tout en retenant la relation donnant la charge par I_3 constante, on n'exige pas que cette constante soit $B/2$ (par V.12), mais on permet qu'elle soit arbitraire. On écrira cette constante arbitraire, qui spécifie le centre de charge du multiplet, sous la forme $B/2 + S/2$ (S étant un entier). On a alors :

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2} = I_3 + \frac{Y}{2} \quad (V.14)$$

avec S pouvant varier d'un multiplet à l'autre.

Toutes les particules ordinaires sont alors caractérisées par la valeur $S = 0$ et toute particule à $S \neq 0$ est un membre d'un multiplet "déplacé", mais un membre étrange. Gell-Mann donna à S le nom d'étrangeté et celui de particule étrange à toute particule à $S \neq 0$. La quantité Y a reçu par la suite le nom d'hypercharge.

TABLE V

Particules		Q	I	I_3	B	S
BOSONS	π^+	+1	1	+1	0	0
	π^0	0	1	0	0	0
	π^-	-1	1	-1	0	0
	K^+	+1	1/2	+1/2	0	+1
	K^0	0	1/2	-1/2	0	+1
	K^-	-1	1/2	-1/2	0	-1
	\bar{K}^0	0	1/2	+1/2	0	-1
	?	+1	0	0	0	+2
	?	-1	0	0	0	-2
	BARYONS	p	+1	1/2	+1/2	+1
n		0	1/2	-1/2	+1	0
Λ^0		0	0	0	+1	-1
Σ^+		+1	1	+1	+1	-1
Σ^0		0	1	0	+1	-1
Σ^-		-1	1	-1	+1	-1
Ξ^-		-1	1/2	+1/2	+1	-2
Ξ^0		0	1/2	-1/2	+1	-2
Ω^-		-1	0	0	+1	-3
Ξ^+		+1	0	0	+1	+1

Les Hadrons et leurs nombres quantiques principaux (le spin n'est pas porté).

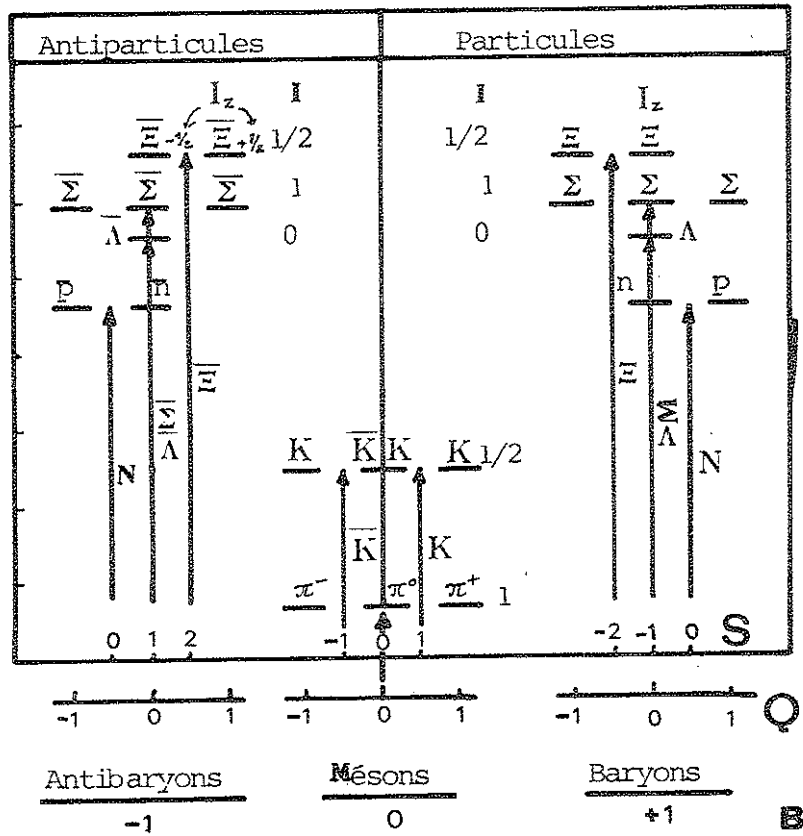


Fig.34 La classification des particules et antiparticules d'après Gell-Mann.

D'après (V.14) par conjugaison de charge les quantités Q , I_3 et B , changent de signe ; S doit donc aussi changer de signe.

Les doublets des kaons : D'après (V.13) un kaon se désintégrant en deux pions doit avoir un $S = \pm 1$, et, comme on ne connaît pas de mésons à charge multiple, la seule possibilité d'attribuer un spin isotopique à ces particules est la suivante :

un doublet de $S = +1$ ayant pour membres le K^+ et le K^0
un doublet de $S = -1$ ayant pour membres le K^- et le \bar{K}^0

D'où la réponse à la question de Fermi (p. 205) : le K^0 se distingue du \bar{K}^0 par son étrangeté opposée.

La figure 34 montre la nouvelle classification des particules ⁽³²¹⁾, telle qu'elle avait été établie à un moment où la particule Ω^- , singulet de charge -1 et d'étrangeté -3, était encore inconnue, mais, d'après Gell-Man, elle devrait se désintégrer en $\Xi + \pi$ (ou γ), une prédiction qui n'a été confirmée que 10 ans plus tard ⁽²⁵⁶⁾, pour le plus grand succès de la théorie.

En se limitant aux valeurs de la charge $Q = +1, 0, -1$, on peut donc dresser le tableau suivant, qui prévoit, en plus des particules connues, un singulet baryonique de $S = +1$, noté Z^+ par Gell-Mann et pouvant se désintégrer en nucléon + pion, et deux singulets bosoniques de $S = \pm 2$ et $Q = \pm 1$ respectivement, de masse inférieure à celle de deux kaons. Aucune de ces particules n'a été découverte expérimentalement jusqu'à présent.

Conséquences : la conservation de l'étrangeté par les interactions fortes, qui découle de celle de I_3 , explique donc parfaitement :

- a) la grande stabilité des nouvelles particules, qui ne peuvent plus se désintégrer rapidement (par voie forte) en particules ordinaires et
- b) leur production associée, puisque dans une interaction entre particules ordinaires, il ne peut jamais y avoir production d'une seule particule étrange ; il en faut au moins deux d'étrangetés opposées.

D'autre part, le principe de l'indépendance de charge exige la conservation de l'étrangeté par les interactions électromagnétiques ; par

conséquent une particule étrange ne peut pas se désintégrer par voie électromagnétique en particules non-étranges.

Une telle désintégration n'est possible que par l'intermédiaire de l'interaction faible, qui viole l'étrangeté ; une telle interaction ne conserve d'ailleurs ni I ni I_3 .

A partir des considérations précédentes, il devient possible de faire toute une foule de prédictions théoriques du plus grand intérêt, en introduisant le Principe des Interactions Fortes Obligatoires (Principle of Compulsory Strong Interactions), d'après lequel tout processus entre baryons, antibaryons et bosons qui n'est pas interdit par une loi de conservation a effectivement lieu, avec une probabilité notable. Par contre, tout processus qui n'est pas obligatoire, est interdit (Anything that is not compulsory is forbidden).

Notons, par exemple, quelques réactions permises ou interdites par ce principe totalitaire :

TABLE VI
REACTIONS

permises	interdites
$p + \bar{p} = \Lambda^0 + \bar{\Lambda}^0$	$n + n = \Lambda^0 + \Lambda^0$
$\pi^- + p = \Lambda^0 + K^0$	$\pi^- + p = \Lambda^0 + \pi^0$
$\pi^- + p = \Sigma^- + K^+$	$\pi^- + p = \Sigma^+ + K^-$
.	.
.	.
etc.	etc.

On obtient aussi un grand nombre de relations entre sections efficaces des différentes réactions permises.

V.6 LE PARADOXE THETA-TAU ET LA VIOLATION DE LA PARITE

Une autre difficulté soulevée à propos des nouvelles particules, constitue ce que pendant longtemps on a appelé le paradoxe théta-tau, difficulté qui allait en s'aggravant au fur et à mesure que le nombre des kaons positifs accumulés dans chaque laboratoire allait en croissant. Il semblait,

en effet, que les particules θ^+ et τ^+ avaient pratiquement les mêmes masses et les mêmes vies moyennes ; d'où la tendance à les considérer comme une seule et même particule, présentant des modes de désintégration différents. Mais cela n'allait pas sans difficultés. En effet dès 1953, Dalitz faisait remarquer⁽³²²⁾ que ces deux particules ne pouvaient pas avoir un même spin-parité (J^P), car pour un spin donné J la désintégration du $\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ conduit à un état final de deux pions de moment orbital J et de parité $(-1)^J$, tandis que le τ^+ , se désintégrant en trois pions, devait avoir un spin-parité de $J^P=0^-$ (à la rigueur 2^+), incompatible avec $(-1)^J$. Donc des deux choses l'une : ou bien il doit s'agir de deux particules différentes, ou bien l'identité des masses et des vies moyennes est purement accidentelle.

Personne à ce moment-là ne pouvait se douter que la parité, au moins dans certains cas, ne se conservait pas et que par conséquent elle ne constituait pas un bon nombre quantique.

La situation changea brusquement en 1956 dans les circonstances suivantes⁽³²³⁾ :

"En avril 1956, au cours d'un Congrès de Physique Nucléaire à l'Université de Rochester à New York, une discussion animée s'engagea à propos du mystère théta-tau. Richard Phillips Feynman, un physicien de l'Institut de Technologie de Californie, osa demander si la loi de conservation de la parité pouvait être parfois mise en défaut ..."

"La question avait été suggérée à Feynman la nuit précédente par Martin Block, un spécialiste de physique expérimentale qui était son compagnon de chambre. La solution du mystère théta-tau pouvait se révéler très simple, disait Block. Peut-être suffisait-il d'admettre que la loi de parité, si chère aux physiciens, ne s'appliquait pas toujours. Feynman répondit que, si tel était le cas, on aurait un moyen de distinguer la droite de la gauche. Ce serait surprenant, poursuivit Feynman, mais il ne voyait pas comment cette notion pourrait être en contradiction avec les résultats expérimentaux connus. Et il promit à Block de poser la question le lendemain au congrès pour voir si quelqu'un pouvait trouver un défaut à cette hypothèse. C'est ce qu'il fit en annonçant "Je pose cette question à la place de Martin Block". Il considérait cette question comme extrêmement intéressante, et si elle se révélait exacte, il désirait en conserver le crédit à Martin Block".

"Chen Ning Yang et son ami Tsung Dao Lee, deux jeunes et brillants physiciens d'origine chinoise, assistaient à ce congrès. L'un d'eux répondit longuement à la question de Feynman. Qu'a-t-il dit ? lui demanda plus tard Block. Je ne sais pas, lui répondit Feynman, je ne l'ai pas compris. On me taquina plus tard, écrit Feynman, en prétendant que ma remarque préliminaire citant Martin Block n'était due qu'à ma frayeur d'être associé à une idée aussi folle. Je pensais que cette idée représentait une éventualité très intéressante et possible, quoique peu probable. Quelques mois plus tard un physicien, Norman Ramsey, me demanda si je trouvais intéressant pour lui de tenter une expérience destinée à vérifier si la loi de la parité était mise en défaut dans la désintégration bêta. Je répondis affirmativement ; j'étais pourtant persuadé que la loi de la parité ne pouvait pas être violée, mais il était possible qu'elle le soit et il était très important de le démontrer. Pariez-vous cent dollars contre un que la loi de la parité ne peut pas être violée ? me demanda Ramsey. Non, mais je parierai bien à 50 contre un. Ce sera assez pour moi, me répondit-il. J'accepte votre pari et je tente l'expérience. Ramsey ne trouva malheureusement pas le temps nécessaire à cette expérience à ce moment, mais mon chèque de 50 dollars lui aurait été une légère compensation pour son manque d'opportunité".

"Au cours de l'été 1956, Lee et Yang réfléchirent un peu plus à ce sujet. Au début du mois de mai, assis au Café de la Rose Blanche près du coin de Broadway et de la 125^e rue, à côté de l'Université de Columbia, il leur vint soudain l'idée qu'il pourrait être utile d'étudier soigneusement toutes les expériences connues qui faisaient intervenir des interactions faibles ...".

Voici maintenant le point de vue de Lee et Yang⁽³²⁴⁾ en Juin 1956 :

"Les expériences connues indiquent une conservation de la parité dans les interactions fortes et électromagnétiques à un grand degré de précision, mais pour les interactions faibles (c'est à dire pour les désintégrations des mésons et des hypérons, et pour différentes interactions de Fermi) cette conservation n'est actuellement qu'une hypothèse extrapolée, sans support expérimental. (on peut même dire que le puzzle actuel de θ - τ peut être considéré comme une indication de violation de la parité dans les interactions faibles). Pour décider de manière univoque si la parité est conservée dans les interactions faibles, on doit effectuer une expérience afin de déterminer si les interactions faibles sont capables de différencier la droite de la gauche".

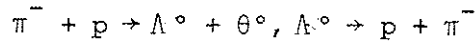
Ils indiquent alors plusieurs expériences susceptibles de fournir une réponse à cette question :

- a) la détermination de la distribution angulaire des électrons de radioactivité β des noyaux orientés, qui doit être de la forme :

$$I(\theta) d\theta = (\text{constante}) (1 + \alpha \cos\theta) \sin\theta d\theta$$

avec $\alpha \neq 0$, si la parité n'est pas conservée.

- b) L'étude de la désintégration des Λ^0 provenant de la réaction :



- c) L'étude de la chaîne :



L'article de Lee et Yang a causé un grand embarras et une non moins grande excitation tant chez les théoriciens que chez les expérimentateurs ; personne ne comprenait très bien de quoi il s'agissait et Dyson⁽³²⁵⁾ parlait de la "cécité" de la plupart des théoriciens. Finalement le défi fut relevé par Mme Wu et ses collaborateurs⁽³²⁶⁾ qui entreprirent une expérience difficile, afin de vérifier les idées de Lee et Yang. Voici brièvement de quoi il s'agit : le noyau de Co^{60} est un émetteur β^- de spin-parité 5^+ , se désintégrant en un noyau de Ni^{60} excité de spin parité 4^+ , un électron et un antineutrino, tous deux de spin $1/2$. En orientant les noyaux de cobalt par un champ magnétique au voisinage du zéro absolu et en représentant par des flèches simples les impulsions et par des flèches doubles les spins des différentes particules, nous avons le schéma suivant :

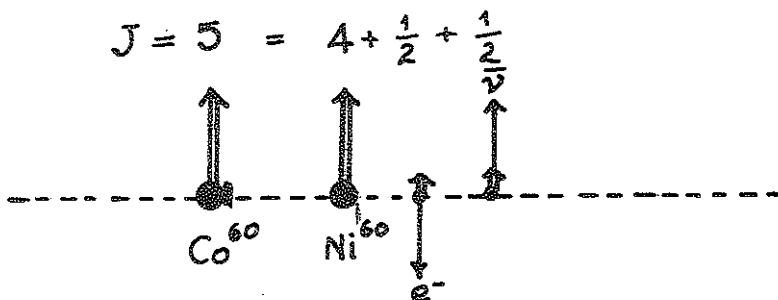


Figure 35

Si le spin du cobalt est orienté vers le haut, l'émission de l'électron de désintégration se fait préférentiellement vers le bas.

Le processus est asymétrique* en ce sens que le même processus vu dans un miroir ne correspond à aucune réalité physique et il nous offre la possibilité de définir de façon objective la droite et la gauche.

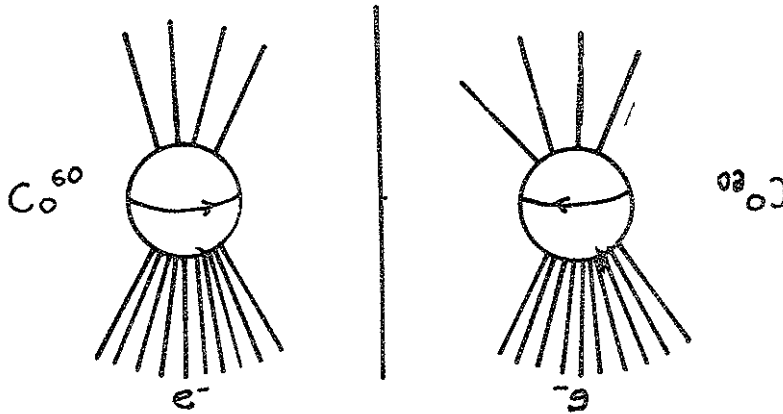
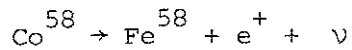


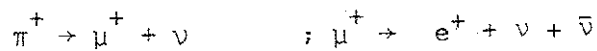
Figure 36

La même expérience faite avec du Co^{58} qui se désintègre suivant le schéma :



a donné le résultat contraire : le positron émerge dans la direction opposée à celle de l'électron du Co^{60} .

D'autres expériences (327, 328) ont montré que la parité est violée dans la chaîne des désintégrations :



Ainsi la désintégration π^+ peut être représentée par le schéma suivant :

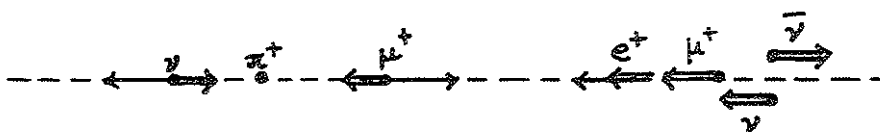


Figure 37

La situation est inverse dans le cas de la chaîne $\pi^- \mu^- e^-$.

Finalement l'hélicité du neutrino a été mesurée directement en 1957 ; elle a été trouvée négative⁽³²⁸⁾.

Comme Lee et Yang l'ont signalé, les expériences précédentes prouvent non seulement que la parité est violée, mais aussi que la conjugaison de charge l'est également. Fallait-il donc abandonner la croyance profondément ancrée dans les esprits de la symétrie de l'espace ? Landau, toujours en avance sur les expérimentateurs, a montré⁽³²⁹⁾ que toute asymétrie spatiale disparaît si toutes les interactions sont invariantes par l'opération CP.* Nous verrons par la suite que cela n'est pas vrai pour les interactions faibles.

Aussitôt connus les résultats préliminaires de l'expérience de Wu, plusieurs théoriciens ont fait appel à l'ancienne théorie de Weyl⁽³³⁰⁾, abandonnée depuis longtemps parce que précisément elle violait la parité, dite théorie du neutrino à deux composantes, suivant laquelle la violation de la parité est intimement liée à la propriété du neutrino de ne posséder qu'un seul état de polarisation (toujours droit ou toujours gauche) avec son spin parallèle ou antiparallèle à son impulsion respectivement.⁽³³¹⁻³³³⁾

Notons que cette théorie est invariante par l'opération CP. Mais la conséquence la plus importante de la violation de la parité et des expériences qui ont suivi est la reformulation de la théorie de la radioactivité β et plus généralement des interactions faibles.

En effet dès 1948 plusieurs théoriciens ont fait remarquer⁽³³⁴⁻³³⁶⁾ que la constante de couplage responsable de la radioactivité β était du même ordre de grandeur que celle de la désintégration et de la capture du μ ; cette similitude permit à Puppi⁽³³⁴⁾ de suggérer que "les constantes de Fermi entre particules de Dirac sont toutes égales entre elles". C'est la première tentative vers une Interaction Universelle de Fermi, visualisée par le triangle de Puppi (fig.38). Après la découverte des particules étranges, Dallaporta⁽³³⁷⁾ a proposé l'extension de cette notion aux particules nouvelles et plus tard Gell-Mann a transformé le triangle de Puppi en tétraèdre (fig.39). Mais ce n'est qu'après la découverte de la violation de la parité et la détection expérimentale du neutrino que les théoriciens⁽³³⁸⁻³³⁹⁾ ont entrepris la reformulation de la théorie de Fermi (théorie V-A) et cela malgré quelques expériences du moment qui semblaient en contradiction avec cette structure en V-A. Qu'à cela

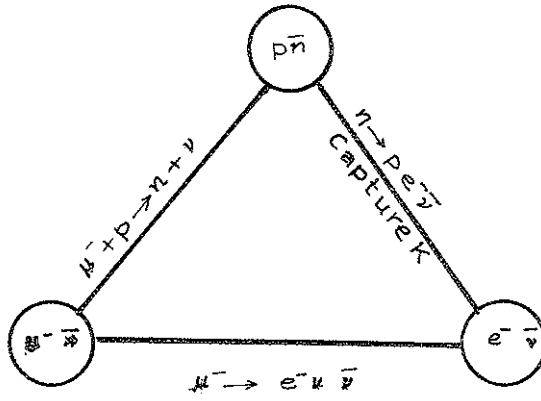


Fig.38 Le triangle de Puppi.

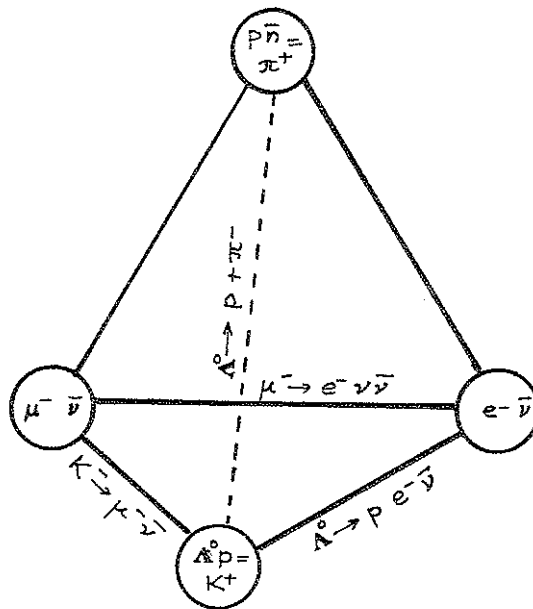


Fig.39 Le tétraèdre de Cell-Mann

ne tienne, "these theoretical arguments", écrivent Feynman et Gell-Mann, "seem to the authors to be strong enough to suggest that the disagreement with the He⁶ recoil experiment and with some other less accurate experiments indicates that these experiments are wrong." (339)

Il a fallu très peu de modifications de la théorie initiale de Fermi, qui croyait à une interaction du type vectoriel, pour la rendre universelle, à savoir l'addition de quelques facteurs $(1 + \gamma_5)/2$ dans l'expression des courants et son extension aux particules étrangères, par introduction des courants couplés $(\bar{\Lambda}^0 p)$ $(\bar{\nu}_\mu)$, etc.

En poussant un peu plus loin l'analogie avec l'électrodynamique quantique, Feynman et Gell-Mann imaginent alors que l'interaction de Fermi est due à un boson intermédiaire vectoriel W, électriquement chargé et de grande masse couplé au courant $(\bar{\psi}_p \gamma_\mu \frac{1 + \gamma_5}{2} \psi_n)$ et $(\bar{\psi}_\mu \gamma_\mu \frac{1 + \gamma_5}{2} \psi_\nu)$. L'échange de ce méson provoque l'interaction entre les deux courants ; on parle alors d'une interaction courant-courant, le courant total étant :

$$J = (\bar{\psi}_p \gamma_\mu \frac{1 + \gamma_5}{2} \psi_n) + (\bar{\psi}_\nu \gamma_\mu \frac{1 + \gamma_5}{2} \psi_e) + (\bar{\psi}_\nu \gamma_\mu \frac{1 + \gamma_5}{2} \psi_\mu) + \dots \quad (V.15)$$

L'hamiltonien de l'interaction prend ainsi la forme :

$$H_{\text{faible}} = J_\mu^* J_\mu \quad (V.16)$$

$$\text{avec } J_\mu = 1/2(J_\mu^V + J_\mu^A) \text{ et } J_\mu^V = \bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n, \quad J_\mu^A = \bar{\psi}_p i\gamma_\mu \gamma_5 \psi_n \quad (V.17)$$

qui sont la partie vectorielle et la partie axiale du courant.

Il n'est pas superflu de signaler que délibérément Feynman et Gell-Mann avaient ignoré dans leur théorie les courants neutres, comme $(\bar{e}e)$, $(\bar{\mu}e)$, $(\bar{n}n)$, etc, qui semblaient ne pas exister dans la nature.

Il serait fastidieux d'aligner ici toutes les expériences et tous les arguments théoriques qui ont enfin imposé la théorie V-A. Signalons cependant une grave difficulté de cette théorie ; elle prévoyait pour la désintégration $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu$ un rapport de branchement de $\sim 10^{-4}$ tandis que ce mode n'avait pas été observé. Ce dernier obstacle a été levé par la découverte de ce processus (340) avec le bon ordre de grandeur pour le rapport de branchement (341).

Pour en terminer avec le paradoxe des kaons et en anticipant légèrement sur l'ordre chronologique, il nous reste encore à signaler l'importance découverte de la non-conservation de l'opération PC. Dès 1958 quelques expériences indiquaient⁽³⁴²⁾ que le K_2^0 se désintégrait rarement en deux mésons π , ce qui est impossible pour un état propre de PC = -1 ; deux autres expériences effectuées en 1961,⁽³⁴³⁻³⁴⁴⁾ avaient montré que cette désintégration a effectivement lieu avec un rapport de branchement inférieur à 0,3%. C'est pour préciser mieux ce rapport qu'une nouvelle expérience plus élaborée a été entreprise en 1964⁽³⁴⁵⁾ ; elle a conduit à une valeur de

$$R = \frac{K_2^0 = \pi^+ \pi^-}{K_2^0 = \text{tout}} = (2,0 \pm 0,4) 10^{-3}.$$

Ce fut la preuve définitive de la violation de PC dans les interactions faibles, dont on trouvera tous les détails en réf. (292).

Cette situation nouvelle a conduit à une légère modification de la nomenclature des kaons neutres : K_1^0 et K_2^0 désignent maintenant les états propres de l'opérateur PC de valeur propre +1 et -1 respectivement et on appelle K_S^0 (short lived) et K_L^0 (long lived) les particules physiques de vie moyenne courte et longue, qui sont les particules que l'on observe effectivement dans une expérience.

L'hypothèse de Cabibbo : l'hypothèse d'une Interaction Universelle de Fermi (UFI) s'est heurtée à quelques difficultés à propos des désintégrations leptoniques avec changement d'étrangeté, comme :

$$\begin{aligned} K^+ &= \mu^+ + \nu & K^+ &= \pi^0 + e^+ + \nu \text{ et} \\ \Lambda^0 &= p + e^- + \bar{\nu} & \Sigma^- &= n + e^- + \bar{\nu} \end{aligned}$$

qui sont 20-40 fois moins rapides que les processus sans changement d'étrangeté :

$$\begin{aligned} \pi^+ &= \mu^+ + \nu & \pi^+ &= \pi^0 + e^+ + \nu \\ n &= p + e^- + \bar{\nu} \end{aligned}$$

Pour remédier à ce défaut, Cabibbo⁽³⁴⁶⁾ a introduit un nouveau postulat d'après lequel les constantes de couplage du pion g_π et du kaon g_K ne sont pas rigoureusement égales et doivent être remplacées par une constante universelle g_0 (charge faible) , telle que :

$$g_\pi = g_0 \cos \theta ; g_K = g_0 \sin \theta.$$

L'angle θ , appelé angle de Cabibbo, étant défini par :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{g_{\pi}(\Delta S = 1)}{g_K(\Delta S = 0)}$$

a pour valeur approximative $\theta = 0,26$ radians.

Cela revient à introduire dans l'hamiltonien (fig.40) le courant tourné, qui est une combinaison linéaire d'un courant changeant l'étrangeté et d'un courant qui la conserve, de la forme :

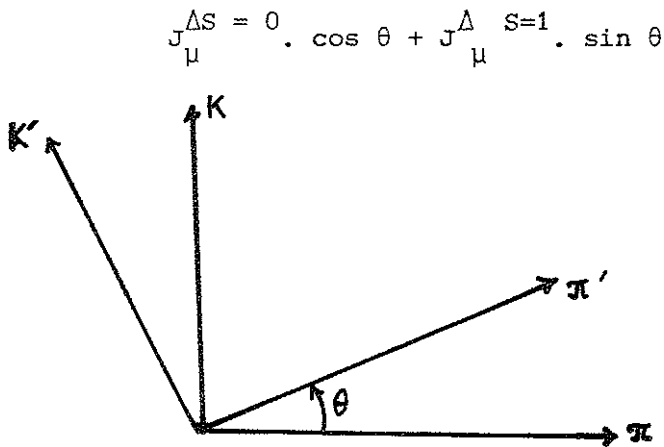


Fig.40 Le courant de Cabibbo.

VI. ANTI-NUCLEONS ET ANTIMATIÈRE

A.S. Eve⁽³⁴⁷⁾ rapporte qu'en 1921 au cours d'une discussion entre Rutherford et Compton, ce dernier avait parlé en faveur de l'existence possible d'un "gros électron" ayant la masse du proton et une charge électrique négative, mais Rutherford ne voulait pas dans son laboratoire "to have an electron as big as a balloon".

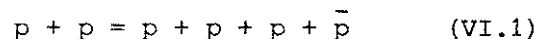
Cet état d'esprit s'est trouvé profondément modifié après la brillante confirmation de la théorie de Dirac avec la découverte de l'électron positif. En tirant toutes les conclusions de sa théorie Dirac affirmait avec force dans sa conférence Nobel (1933) : "One would like to have an equally satisfactory theory for protons. This would require the possibility of existence of negatively charged protons forming a mirror-image of the usual positively-charged ones... In any case I think it is probable that negative protons can exist, since as far as the theory is yet definite, there is a complete and perfect symmetry between positive and negative electric charge, and if this symmetry is really fundamental in nature, it must be possible to reverse the charge of any kind of particles" (italiques ajoutées)⁽³⁴⁸⁾. Mais à cette époque il n'était pas évident que la théorie de Dirac pouvait s'appliquer à des particules aussi lourdes que le proton. La possibilité suggérée par Dirac fut de nouveau envisagée sérieusement en 1938 par F. Perrin et plus tard Arley⁽³⁴⁹⁾ signalait que les particules primaires du rayonnement cosmique pourraient être des nucléons et des antinucléons en nombres égaux ; Fermi et Yang⁽³⁵⁰⁾ envisageaient l'hypothèse que les pions ne sont que des agrégats virtuels nucléon-antinucleon ($\pi^0 = n\bar{n}$, $\pi^+ = p\bar{n}$, $\pi^- = n\bar{p}$). Cependant du côté expérimental il n'y avait pas la moindre indication sur l'existence possible ou même probable d'antiprotons, de sorte que des sérieux doutes commençaient à troubler les esprits au sujet de l'antiproton.

Certes la théorie de Dirac prévoyait déjà un certain nombre de propriétés de l'hypothétique antiproton, à savoir :

même masse et même spin que le proton
Charge électrique et moment magnétique opposés.
même statistique (Fermi-Dirac) et
parité intrinsèque opposée,
mais toutes ces propriétés n'étaient pas d'une très grande utilité pour les expérimentateurs.

Quelques étoiles provoquées par le rayonnement cosmique dans les émulsions photographiques, pouvaient à la rigueur être interprétées en termes d'annihilation d'antinucléons⁽³⁵¹⁾, mais une telle interprétation n'était ni évidente ni la seule possible ; ce n'était tout au plus qu'une hypothèse invérifiable.

Devant une telle situation la seule issue possible consisterait à produire artificiellement ces antinucléons, mais même de ce côté les accélérateurs existants étaient très insuffisants. C'est la raison pour laquelle McMillan et Lawrence ont fixé l'énergie du futur bévatron de Berkeley à 6 GeV ; en effet la réaction :



ne peut avoir lieu qu'à partir d'un seuil qui est de 5,63 GeV sur protons au repos (ce seuil se trouve abaissé à 4,3 GeV, si l'on tient compte du mouvement de Fermi du proton dans le noyau).

Deux expériences furent entreprises simultanément aussitôt que la machine a atteint 5,0 GeV, pour la détection de l'insaisissable antiproton⁽³⁵²⁾, toutes deux ont parfaitement confirmé son existence. Simultanément le même groupe de chercheurs, suggérait la possibilité de détection de l'antineutron⁽³⁵³⁾ par la réaction d'échange de charge :



Une élégante expérience par compteurs a été réalisée en 1956 ; elle consistait à admettre les antineutrons, ainsi produits sur une cible de Be, dans un compteur Cerenkov en verre au plomb, dans lequel leur annihilation produit une forte impulsion lumineuse, détectée par un ensemble de photomultiplicateurs⁽³⁵⁴⁾.

Dans une autre expérience en chambre à bulles à liquide lourd on a pu photographier les étoiles d'annihilation des antinucléons⁽³⁵⁵⁾.

Le mystère des antinucléons était ainsi parfaitement résolu et de nombreuses expériences furent entreprises par la suite, pour l'étude de leurs propriétés ; on trouvera en références 356³ et 357 un compte-rendu détaillé sur l'ensemble de ces problèmes.

Les antiparticules étranges, comme l'antilambda, l'antisigma, l'antiksi, etc ont également été observés à partir de 1958.

On a de même réussi à observer des antinoyaux, comme l'antideuton⁽³⁵⁸⁾ l'antihélium⁽³⁵⁹⁾, confirmant ainsi la parfaite légitimité de l'existence de l'antimatière en général.

Sans entrer dans les détails, signalons que l'annihilation des antinucléons ne conduit pas directement à des photons, comme on le pensait au début, mais passe principalement par la production de pions, en nombre variable, et dans environ 1% des cas par la production de paires kaon-antikaon. L'annihilation en paires de leptons (e^+e^- et $\mu^+\mu^-$) est encore plus faible et de l'ordre de 200 nanobarns.

En ce qui concerne les conséquences cosmologiques de l'existence des antiparticules, dans l'état actuel de la connaissance, on ne peut formuler que des conjectures. Cet important sujet préoccupe actuellement les cosmologistes et il existe plusieurs théories sur la structure symétrique de l'Univers, constitué des parties égales de matière et d'antimatière, mais il n'y a pour le moment aucun moyen expérimental à l'appui de cette hypothèse, qui reste dans le stade métaphysique. Il n'est donc pas possible de tirer des conclusions valables sur ce sujet. Il est parfaitement possible que notre Univers soit effectivement constitué de matière et d'antimatière tout comme il est possible qu'il ne contienne que de la matière uniquement, mais nous n'avons aucune preuve expérimentale à la faveur de l'une plutôt que de l'autre de ces hypothèses.

VII. L'INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE ET LA STRUCTURE DU NUCLEON

(Facteurs de Forme Electromagnétiques)

Un an après la formulation de la théorie de l'électron par P.A. M. Dirac⁽³⁶⁰⁾, Mott⁽³⁶¹⁾ établissait la théorie de la diffusion des électrons rapides par les noyaux ; en tenant compte du spin de l'électron et dans le cas relativiste ($v/c \sim 1,00$), Mott donna une formule de diffusion qui ne différait de celle de Rutherford que par un facteur $\cos^2 \frac{\theta}{2}$; l'auteur était parfaitement conscient que sa formule ne reproduisait pas d'une manière satisfaisante les données existantes sur la diffusion des électrons de radioactivité β par la matière. Bien des années plus tard, l'interaction des électrons avec les atomes, suggérée par Guth⁽³⁶²⁾ comme moyen d'exploration du noyau, était mise en évidence expérimentalement^(363,364) et Rose⁽³⁶⁵⁾ faisait remarquer que la grandeur finie du noyau pourrait bien conduire à des déviations par rapport à la formule de Mott, si la longueur d'onde de Broglie des électrons devient de l'ordre de grandeur des dimensions du noyau, offrant ainsi la possibilité de déterminer la forme de la distribution de la charge électrique et la taille des noyaux. C'était précisément le moment où, grâce aux nouveaux accélérateurs, des faisceaux d'électrons rapides étaient devenus disponibles auprès des bévatrons et des synchrotrons à électrons ; ils pourraient donc servir pour "obtenir quelque information sur la structure nucléaire". Comme Rose l'écrivait "le noyau diffuseur ne peut pas être regardé comme une charge ponctuelle, mais il doit être représenté par une distribution de la charge ayant une certaine extension et dont la forme peut être explorée par la diffusion des électrons qui pénètrent à l'intérieur du noyau" ; et plus loin "avec l'hypothèse d'une interaction coulombienne entre charges, il est donc possible de déterminer explicitement la

densité de charge en termes du facteur de forme nucléaire de l'intensité diffusée observée".

Le problème de la diffusion élastique électron-proton a été traité (dans l'hypothèse de validité de l'électrodynamique quantique et en négligeant une interaction faible éventuelle) par Rosenbluth⁽³⁶⁶⁾ qui a donné l'expression de la section efficace, en tenant compte du spin et du moment magnétique. La formule de Rosenbluth peut se mettre sous la forme⁽³⁶⁷⁾ :

$$\frac{d\sigma / d\Omega}{(d\sigma / d\Omega)_{\text{Mott}}} = F_1^2 + \frac{\hbar^2}{4 M^2} \cdot \frac{q^2}{c^2} (2(F_1^2 + KF_2^2) \operatorname{tg}^2(\theta/2) + K^2 F_2^2) \quad (\text{VII.1})$$

Le premier membre de cette formule représente le rapport de la section efficace calculée par Rosenbluth à celle de Mott pour une charge unitaire (ponctuelle) ; le second membre contient deux facteurs, $F_1(q)$ qui est le facteur de forme de Dirac, décrivant la charge et le moment magnétique de Dirac du proton, et $F_2(q)$ qui est le facteur de forme de Pauli, décrivant le moment magnétique anormal du proton ; la constante $K = 1,79$ est la valeur statique du moment magnétique anormal (en magnétons nucléaires). Ces deux facteurs de forme sont des fonctions du transfert q d'énergie-impulsion donné par :

$$q = \frac{(2E/\hbar c) \cdot \sin(\theta/2)}{\sqrt{1 + (2E/\hbar c)^2 \sin^2(\theta/2)}} \quad (\text{VII.2})$$

où θ est l'angle de diffusion, M la masse du proton et E l'énergie.

Plus récemment on utilise à la place des facteurs F_1 et F_2 les combinaisons :

$$\begin{aligned} G_e(q^2) &= F_1(q^2) - \tau \mu F_2(q^2) \\ G_m(q^2) &= F_1(q^2) + \mu F_2(q^2) \end{aligned} \quad (\text{VII.3})$$

avec $\tau = q^2/4M^2$ et $\mu = 1,793$ pour le proton, et $\mu = -1,913$ pour le neutron. Ce sont respectivement le facteur de forme électrique et la facteur de forme magnétique, dont les valeurs dites statiques sont :

$$\left. \begin{array}{l} G_e(0) = 1,00 \\ G_m(0) = 2,793 \end{array} \right\} \text{ pour le proton} \qquad \left. \begin{array}{l} G_e(0) = 0,00 \\ G_m(0) = -1,913 \end{array} \right\} \text{ pour le neutron}$$

Les théoriciens, de leur côté, utilisent les combinaisons :

$$\text{isoscalaire} : G_e^{\text{scal}} = (G_e^{\text{p}} + G_e^{\text{n}})/2 \qquad \text{(VII.4)}$$

$$\text{isovectorielle: } G_e^{\text{vect}} = (G_e^{\text{p}} - G_e^{\text{n}})/2$$

Les formules précédentes permettent d'atteindre les différents facteurs de forme, à partir de la section efficace mesurée en fonction de l'angle de diffusion pour q^2 fixe.

Les premières expériences de diffusion électron-noyau ont été entreprises vers 1951 à l'Université d'Illinois, avec des électrons de 15,7 MeV, puis, à partir de 1953 à Stanford et à Michigan, avec des électrons 10 fois plus énergiques (125-150 MeV). Or la longueur d'onde associée de ces électrons est de 12 à 1,3 fermis; il n'est donc pas étonnant que ces premières expériences n'ont pas fourni des données assez précises pour une exploration en profondeur du noyau, dont le rayon était donné par la formule classique

$$R = r_0 A^{1/3} \text{ fm} \qquad \text{(VII.5)}$$

avec $r_0 = 1,40$. Si les toutes premières expériences étaient en faveur d'une distribution uniforme de la charge dans le volume du noyau, les expériences de Michigan nécessitaient une valeur de r_0 d'environ 20% plus faible que celle donnée par la formule (VII.5). A plus haute énergie la densité de charge ne pouvait plus être décrite à l'aide du seul paramètre R. La figure 41 traduit les résultats obtenus avec les électrons de 187 MeV sur le noyau ^{12}C ; le pic à 184,5 MeV correspond à la diffusion élastique, les autres pics sont dûs aux différents états excités du noyau. Le minimum de diffraction permet de déduire la distribution de la charge dans le noyau

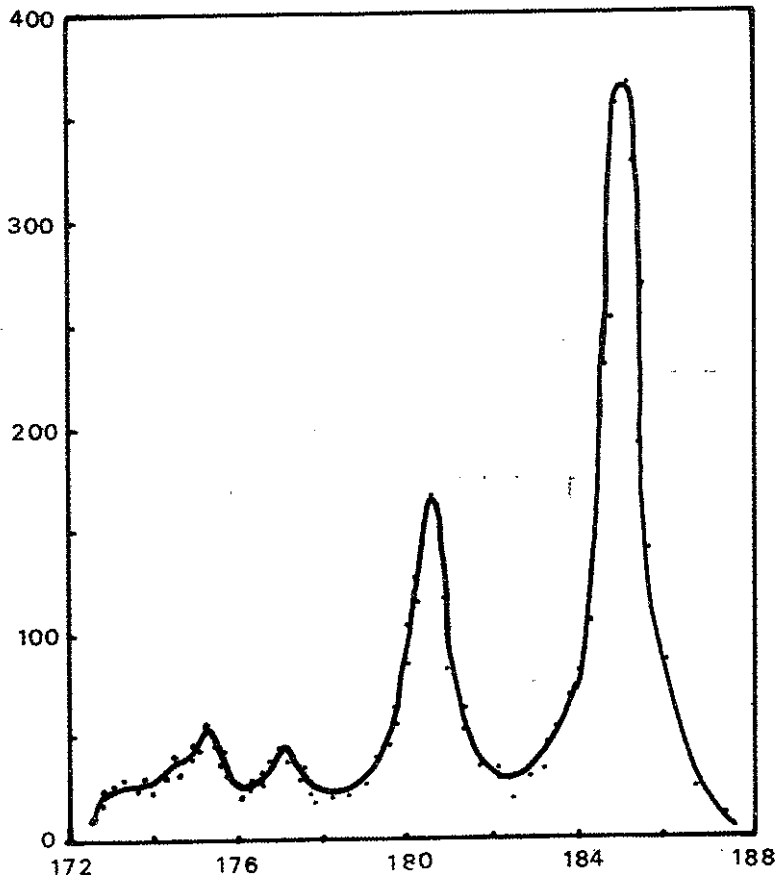


Fig. 41 Diffusion des électrons de 187 MeV sur ^{12}C . Le pic élastique est à 184,5 MeV.

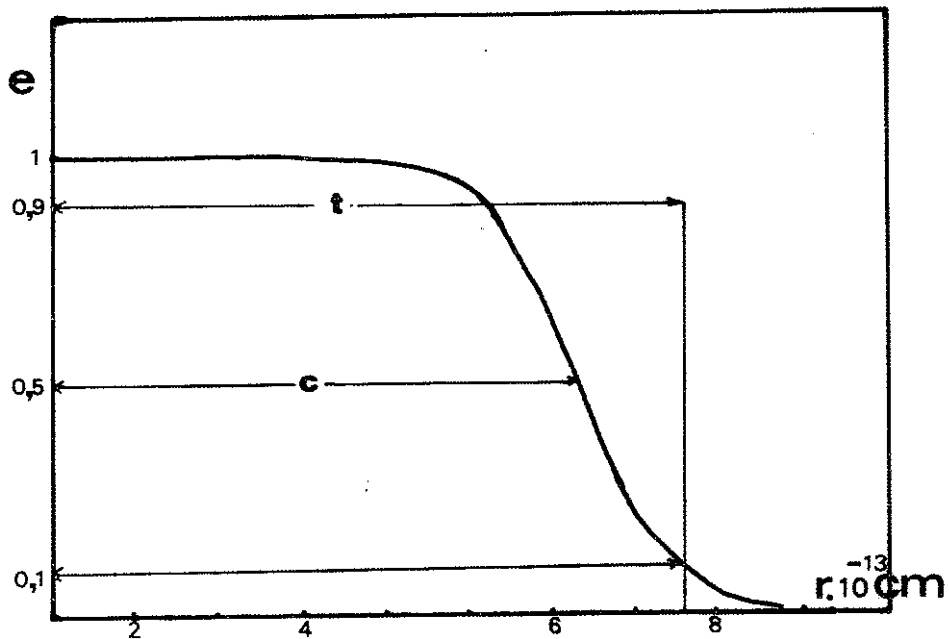


Fig. 42 Les paramètres de forme du noyau d'Or.

(fig. 42). Cette distribution est loin d'être uniforme et peut être décrite à l'aide de deux paramètres :

1) la distance \underline{c} du centre au point où la densité est réduite de moitié et

2) une "épaisseur de peau" \underline{t} , pour laquelle la densité passe de 90% à 10% de sa valeur :

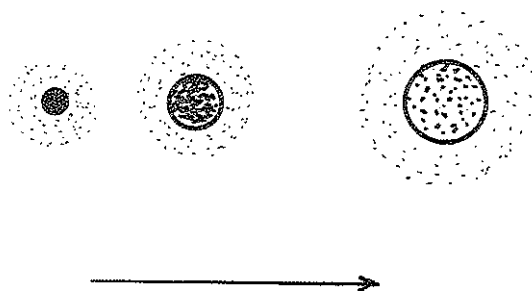
$$\underline{c} = 1,07.A^{1/3} \text{ fm}$$

$$(1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm})$$

$$\underline{t} = 2,4 \text{ fm.}$$

Une expérience de Hofstadter⁽³⁶⁸⁾ sur hydrogène, conduisait à un rayon quadratique moyen du proton de $(0,79 \pm 0,08) \text{ fm}$, soit un rayon vrai de $1,00 \text{ fm}$.

A ce stade (vers 1955) le noyau se présente donc, vu par les électrons, comme un objet à peu près sphérique entouré d'une sorte de "peau" d'épaisseur constante, avec une densité de masse uniforme (d'environ $0,08 \text{ nucléons/fm}^3$) et une densité de charge variable, pour laquelle plusieurs formules ont été proposées. Voici l'image qu'en donnaient Cheng et Wu⁽²⁵³⁾ à la Conférence de Cornell (1971) (fig. 43) :



Energie croissante - Fig. 43

Le coeur d'un noyau ou d'une particule (en noir sur la figure) n'est pas constant, mais dépend de l'énergie des électrons selon une

formule logarithmique :

$$R = r_0 \ln s \quad (\text{VII.6})$$

(s est le carré de l'énergie dans le centre de masse). Ce coeur complètement opaque est entouré d'un nuage gris semi-transparent d'épaisseur constante et de l'ordre du fermi.

Mais laissons le noyau pour nous concentrer plutôt sur ses propres constituants, le proton et le neutron.

Comme nous venons de le voir, les premières expériences n'avaient donné que des résultats médiocres du fait que la longueur d'onde de Broglie des électrons employés était bien supérieure aux dimensions du nucléon. L'extension des mesures à des énergies de 200-550 MeV⁽³⁷⁰⁾ et des angles de diffusion de 30° - 135° par Hofstadter et ses collaborateurs, n'ont pas notablement modifié les premières conclusions et dans un article de revue⁽³⁷¹⁾ les auteurs ont discuté les résultats expérimentaux en termes d'un nucléon "physique", composé d'un nucléon nu entouré de pions qui entrent en interaction avec le nucléon de manière à respecter la symétrie de charge (fig. 44).

Nucléon nu : Proton ●

Neutron ○

Nucléon habillé :



Fig. 44

Le coeur dur, d'un rayon d'environ 0,2 fm comporte une charge électrique de $\sim 0,35 e$ et est entouré d'un nuage pionique épais de $\sim 0,8$ fm et porteur d'une charge de $+0,5e$, éventuellement recouvert d'un second nuage pionique de $\sim 1,4$ fm portant une charge de $0,15e$ ⁽³⁷²⁾.

Des expériences analogues sur le neutron (par l'intermédiaire de cibles de deutérium) ont conduit à des résultats similaires, quoique légèrement différents.

La figure 45 montre la distribution possible de la charge des nucléons en fonction de la distance au centre; on voit en particulier qu'au delà de 1,5fm cette distribution est la même pour le proton et le neutron, mais ce dernier, ayant une charge nette nulle, présente à courte distance une charge variable avec la distance et de valeur moyenne nulle⁽³⁷³⁾.

Ce genre d'expériences a été continué pendant une dizaine d'années aux Etats-Unis avec des énergies allant jusqu'à $\sim 1,00$ GeV, mais à partir de 1960 de nombreuses machines (Cornell, Cambridge, Orsay, Frascati, Hamburg, Yerevan, Novosibirsk...) ont mis à la disposition des physiciens des faisceaux de plus en plus énergiques (1 - 6 GeV) et la récente machine de Stanford atteint 21 GeV. Une nouvelle série d'expériences a donc été entreprise en vue de la vérification de la formule de Rosenbluth (et par là même de l'électrodynamique quantique) et de l'extraction des facteurs de forme électromagnétiques des nucléons. (fig. 45-47)

(374) Les principaux résultats obtenus sont résumés dans la référence . Ils montrent l'excellent accord de l'expérience avec la formule de Rosenbluth et la parfaite validité de l'électrodynamique quantique.

Des résultats similaires ont été obtenus par la diffusion élastique des muons. Ils montrent que le muon se comporte de façon tout à fait semblable à l'électron, c'est-à-dire comme s'il était un "électron lourd"; cela constitue une des énigmes les plus incompréhensibles de la physique du muon.

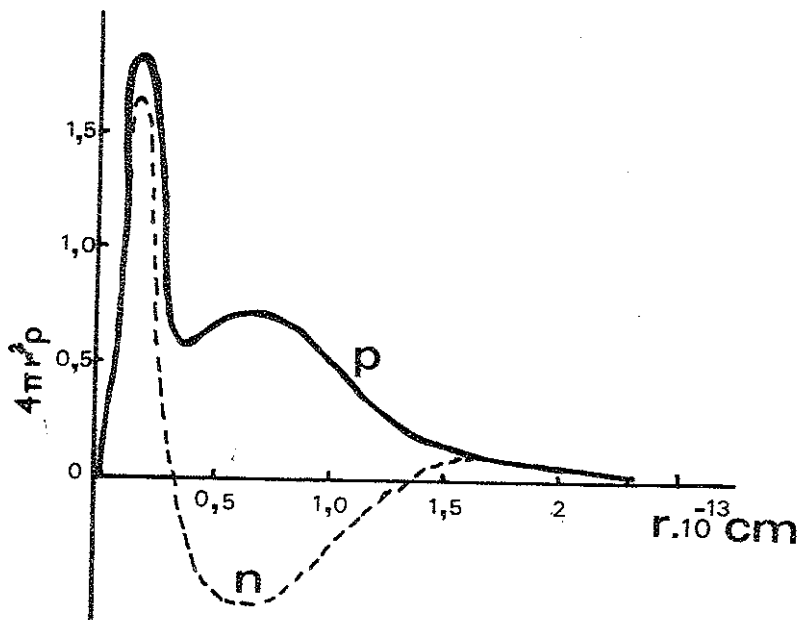


Fig. 45 La charge des nucléons en fonction de la distance du centre.

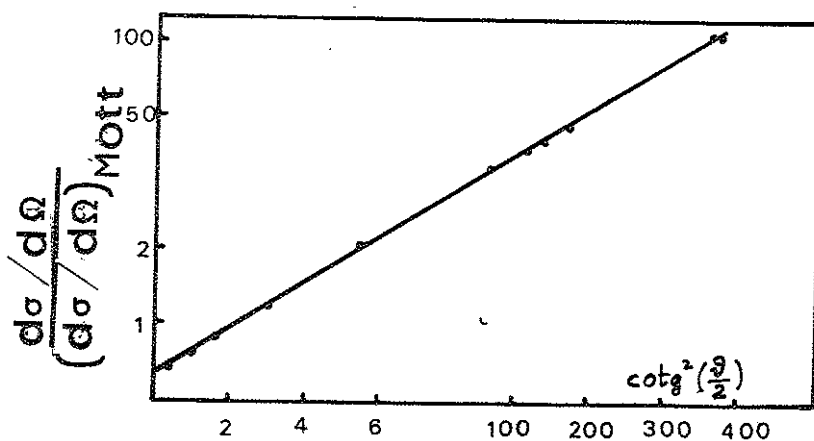


Fig. 46 Comportement de la section efficace élastique e^-p en fonction de l'angle de diffusion.

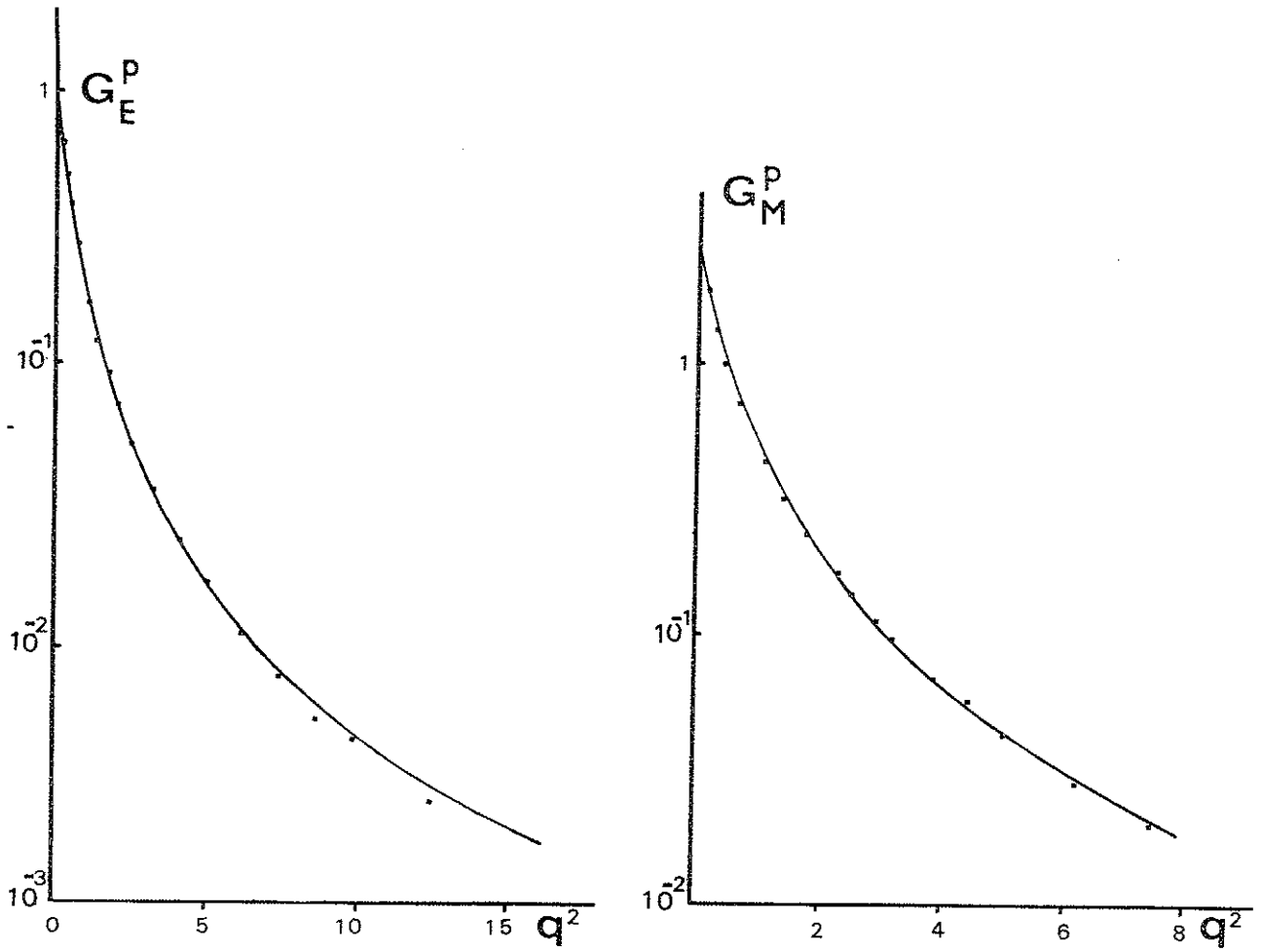


Fig. 47 Facteurs de forme électrique et magnétique du proton en fonction du 4-moment transféré.

D'après le diagramme de Feynman (fig. 48) qui est à la base de la formule de Rosenbluth, une autre conséquence importante de la théorie (dans l'approximation de l'échange d'un seul photon) est l'égalité des sections efficaces $\underline{e}^- - p$ et $\underline{e}^+ - p$ (ainsi que $\underline{\mu}^- - p$ et $\underline{\mu}^+ - p$). Tel est effectivement le cas aux imprécisions des expériences près. En effet le rapport R, défini par :

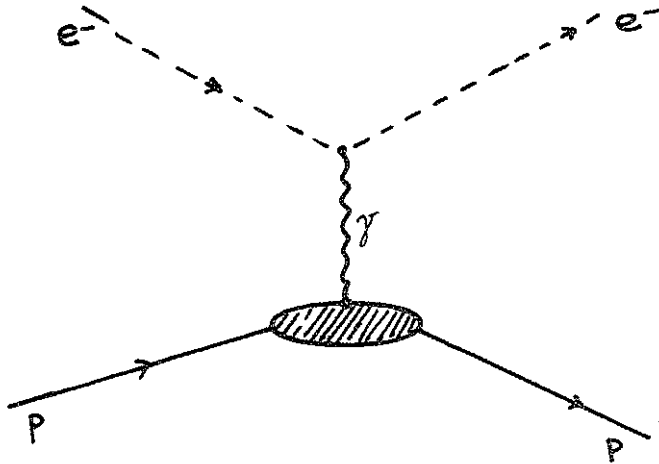


Fig. 48 . Diagramme de Feynman pour la diffusion $\underline{e}^- - p$

$$R = (\underline{\sigma}(\underline{e}^+ p) - \underline{\sigma}(\underline{e}^- p)) / (\underline{\sigma}(\underline{e}^+ p) + \underline{\sigma}(\underline{e}^- p)) \quad (\text{VII.7})$$

est parfaitement compatible avec zéro. (fig. 49).

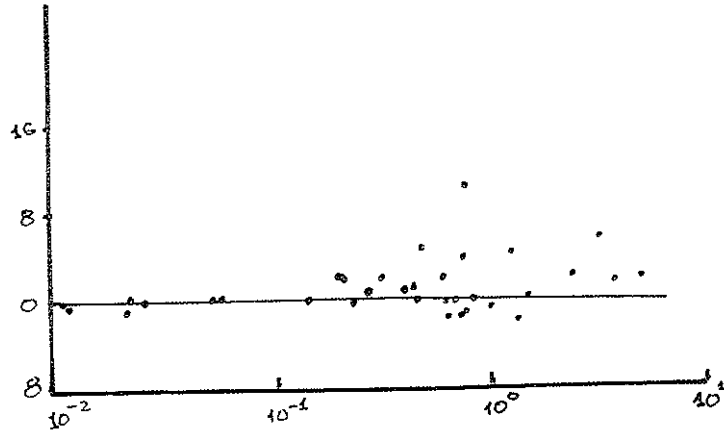


Fig. 49 . Variation du rapport R de la relation (VII.7) en fonction du 4-moment transféré.

Les résultats accumulés pendant ces dernières années montrent également qu'avec une bonne approximation on a :

$$G_e^p(q^2) \sim G_m^p(q^2) / \mu_p \sim G_m^n(q^2) / \mu_n \sim 1 / (1 + \frac{q^2}{0,71})^2 \quad (\text{VII.8})$$

avec q^2 exprimé en $(\text{GeV}/c)^2$ et

$$G_e^n(q^2) \sim 0,0 \quad (\text{VII.9})$$

Toutefois la dernière relation (VII.8) est une relation purement empirique sans aucun support théorique. Ces relations ont reçu le nom d'"invariance d'échelle" sur lequel nous aurons à revenir, car il en existe plusieurs sortes.

Comme dans ce chapitre il a été souvent question de la validité de l'électrodynamique quantique, rappelons qu'un des tests les plus sensibles de cette théorie consiste à mesurer le moment magnétique du muon, dont le rapport gyromagnétique théorique est :

$$\begin{aligned} a \equiv (g-2)/2 &= \alpha / 2\pi + 0,76578(\alpha/\pi)^2 + (21,8 \pm 1,1) (\alpha/\pi)^3 + \dots \\ &= (1165814 \pm 14) 10^{-9} , \text{ pour } \alpha = 1/137,03608 \end{aligned}$$

Ce rapport a été mesuré à plusieurs reprises; le dernier résultat a fourni la valeur suivante :

$$a = (1165895 \pm 27) 10^{-9}$$

Il est remarquable de constater que pour rendre compte des facteurs de forme du nucléon, les théoriciens ont été amenés dès 1957 à considérer sérieusement la possibilité d'existence d'un méson vectoriel neutre (actuellement appelé ω) de masse 2-3 fois plus grande que la masse du pion, fortement couplé au champ nucléaire⁽³⁷⁵⁾; cette particule a été découverte trois années plus tard.

D'autres mésons du même genre ont été envisagés par les théoriciens^(376,377) dans ce même but; ils ont aussi été découverts peu après. Nous y reviendrons par la suite.

Tout comme en 1911 à propos du noyau atomique et de son exploration par Rutherford, il ressort de ces expériences de sondage à l'aide des électrons que le nucléon lui-même, longtemps considéré comme une particule élémentaire, est un objet dont l'exploration n'est pas encore terminée. Ainsi la notion même d'éléментарité se trouve remise en question.

VIII - L'INTERACTION FORTE
VIII.1 - DIX ANS DE PROPHEITIES THEORIQUES

Deux grandes difficultés ont surgi, nous l'avons vu, après la découverte du méson cosmique (muon) : d'une part la vie moyenne expérimentalement mesurée de cette particule ($\sim 2.10^{-6}$ s) cadrerait mal avec la valeur prévue théoriquement pour le méson nucléaire de Yukawa qui était environ 100 fois plus grande; d'autre part la section efficace d'interaction du muon avec la matière était trop faible d'un facteur 100 par rapport à la section efficace géométrique que devait présenter la particule de Yukawa.

Pour passer outre à la dernière de ces difficultés, Bhabha⁽³⁷⁸⁾ proposa de tenir compte d'une sorte d'amortissement de rayonnement (radiation damping) dans la diffusion méson-nucléon; puis, peu de temps après, il suggéra une nouvelle hypothèse, suivant laquelle il doit y avoir des isobares du proton, c'est-à-dire des états excités à charge entière positive ou négative ($\pm e, \pm 2e, \pm 3e, \text{etc.}$) et de masse supérieure à celle du proton, considéré comme l'état d'énergie la plus basse⁽³⁷⁹⁾. Heitler⁽³⁸⁰⁾ envisageait de son côté des états excités de spin ($3/2, 5/2, \dots$) et Wentzel⁽³⁸¹⁾ pensait qu'un méson pouvait être lié à un nucléon "nu" (bare nucleon) pour former une sorte de nucléon composé, de spin et de charge supérieurs à ceux du proton, avec une énergie d'excitation de l'ordre de ~ 50 MeV. Cette notion d'isobares était tellement ancrée dans l'esprit des théoriciens que même l'hypercritique Pauli envisageait avec Dancoff⁽³⁸²⁾ l'existence possible de toute une série d'états excités du nucléon. Quelques années plus tard, Wentzel posait le même problème dans les termes suivants : "il va sans dire que la question à savoir si oui ou non de tels isobares du proton existent réellement, est de la plus grande importance en connection avec le problème de self-énergie, et il est à espérer que les expériences avec les machines de haute énergie décideront bientôt de cette question"⁽³¹⁵⁾

Juste avant la découverte des pions, V. Weisskopf⁽³¹⁴⁾ proposait devant le meeting de l'American Physical Society (2-4 Juin 1947), pour expliquer la formation de mésons par le rayonnement cosmique, la formation d'un état excité du nucléon qui, après un temps relativement long par rapport au processus d'excitation, se désintègre avec émission de plusieurs mésons. C'est à cette même occasion que Bethe et Marshak ont émis leur hypothèse de deux mésons. Peu après la découverte des pions, Bhabha⁽³⁸³⁾ écrivait qu'il a des raisons théoriques de penser qu'il peut exister aussi des mésons bosoniques de masse finie et de spin entier (résonances pioniques), une conclusion à laquelle arrivaient aussi d'autres théoriciens⁽³⁷⁵⁻³⁷⁷⁾ à partir de considérations très différentes sur la diffusion des électrons, dont il a été déjà question.

On arrive ainsi précisément au moment où la nouvelle génération d'accélérateurs entre en opération et qui marque un point décisif pour le développement de la physique des particules, avec les immenses avantages que ces machines offrent par rapport au rayonnement cosmique. Malgré l'énergie moyennement haute des premières machines (à peine quelques centaines de Mev) un immense travail a été entrepris pour l'étude des différentes particules, qui se poursuit encore de nos jours. Il n'est naturellement pas possible de rendre compte ici de tous les travaux accumulés depuis 1947; force nous est donc de nous limiter à quelques aspects particuliers importants de ce sujet inépuisable.

VIII.2 - LE COMPORTEMENT DES SECTIONS EFFICACES

Rappelons d'abord quelques définitions. Considérons pour cela un faisceau de particules monocinétiques de même nature de section 1cm^2 , transportant un nombre n de particules par unité de temps; en traversant une cible de 1cm^2 de surface, d'épaisseur dx infinitésimale, et contenant un nombre N de centres diffuseurs (noyaux) par cm^3 , dont chacun présente une section σ cm^2 ; le nombre des particules du faisceau, qui entrent en interaction avec les noyaux de la cible (par collision) par rapport au nombre des particules frappant cette cible, est donné par la formule :

$$-dn/n = \sigma N \cdot dx$$

(VIII,10)

la quantité σ a les dimensions d'une surface (cm^2), d'où son nom de section efficace du processus envisagé; elle représente la probabilité avec laquelle le processus a lieu, c'est-à-dire le nombre d'événements d'un type donné par unité de flux et par noyau cible (le flux étant le nombre des particules du faisceau qui traverse perpendiculairement l'unité de surface de la cible par unité de temps).

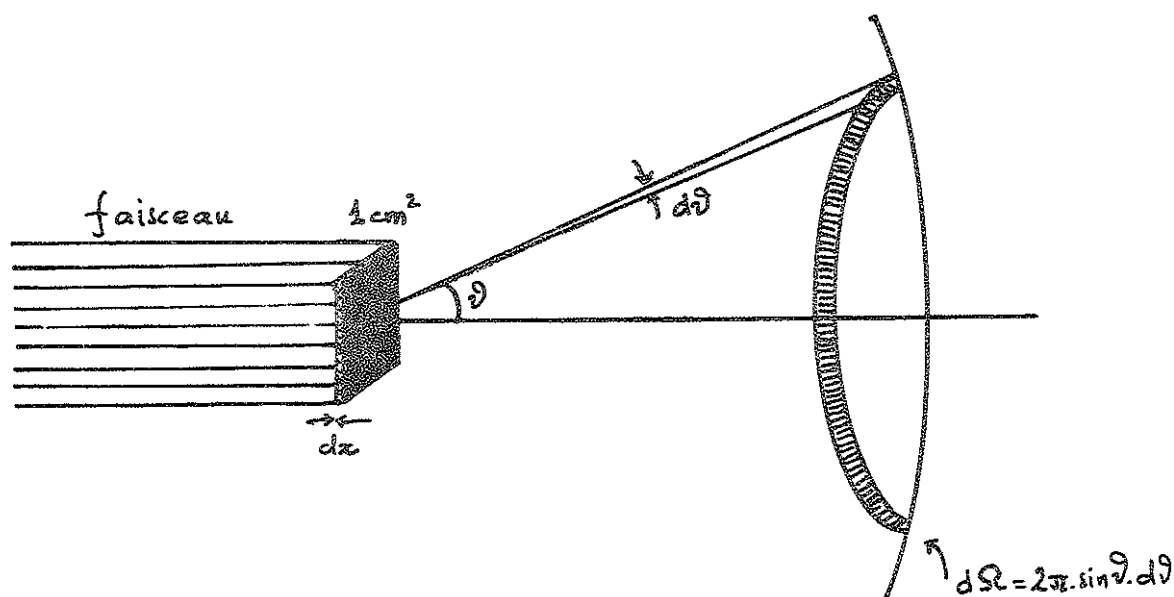
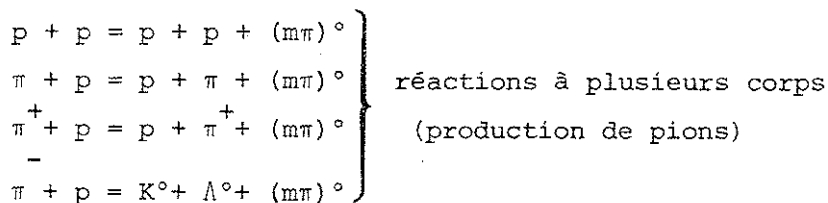
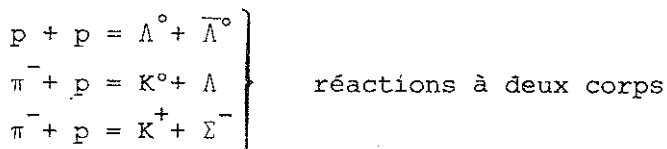
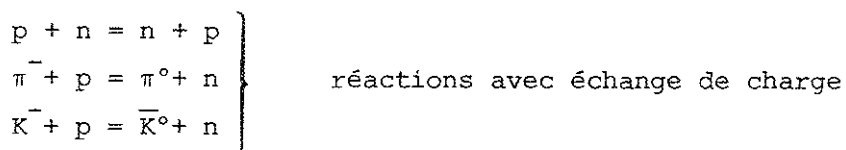
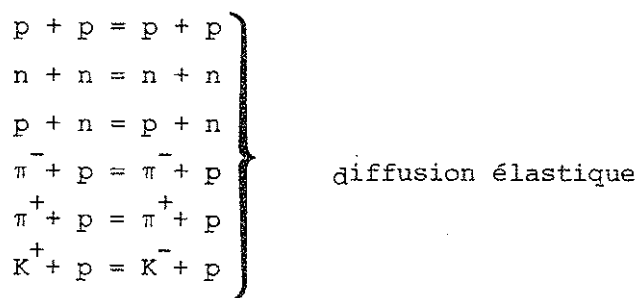


Figure 50

Définition de la section efficace

La section efficace pour tous les processus possibles est la section efficace totale; elle est la somme des sections efficaces partielles pour un processus déterminé (réaction), donnant le nombre des particules sortantes comprises dans l'angle solide $d\Omega$ autour de la direction θ par rapport à l'axe du faisceau : $d\sigma/d\Omega$.

Parmi la grande variété de processus dans les collisions entre hadrons, signalons plus particulièrement les suivants :



où $(m\pi)^0$ signifie un nombre de m pions de charge totale nulle.

Un nombre considérable de réactions de ces types a été étudié, en vue d'obtenir des renseignements sur leur mécanisme et pour une meilleure compréhension de l'interaction forte, et de nombreux modèles ont été construits pour rendre compte des résultats expérimentaux. Malheureusement à l'heure actuelle nous ne possédons pas une théorie cohérente et satisfaisante de cette interaction et chaque modèle ne donne qu'une vue partielle des phénomènes, qui, aux plus grandes énergies actuellement disponibles, semblent se compliquer encore plus.

La diffusion élastique* : Nos connaissances sur la diffusion élastique ont beaucoup évolué pendant ces dernières années, grâce aux nouvelles machines. Contrairement à ce que l'on croyait auparavant la section efficace différentielle élastique n'obéit à la loi exponentielle en \underline{t} que pour les valeurs de \underline{t} inférieures à $0,3 \text{ (GeV/c)}^2$; il semble au contraire que l'exponentielle des faibles \underline{t} s'incurve de manière continue avec \underline{t} .

La figure 51 représente la variation de la section efficace élastique p-p pour $s = 3860 \text{ GeV}^2$. Par analogie avec l'optique ordinaire, la position du minimum permet de calculer le rayon du proton, par la relation

$$\sin \theta \sim \theta \sim \lambda/R \quad (\text{VIII.12})$$

(avec $\lambda = h/p$); la valeur ainsi obtenue est de l'ordre de 1fermi.

Des résultats analogues ont été obtenus pour les différents processus élastiques; il en ressort que si l'on ajuste les résultats expérimentaux pour les faibles valeurs de \underline{t} (entre $0,1$ et $0,4 \text{ (GeV/c)}^2$) par une formule exponentielle de la forme :

$$d\sigma/dt \sim \exp(-bt) \quad (\text{VIII.13})$$

la pente b de l'exponentielle est pratiquement constante, indépendamment de l'énergie, pour la diffusion élastique pion-proton, tandis qu'elle manifeste une nette croissance lente dans la diffusion proton-proton (de l'ordre de 10% entre 20 et 2000 GeV^2); mais il est probablement encore trop tôt pour en tirer des conclusions définitives; pour le moment il semble que b est une fonction linéaire en logarithme de s , de la forme:

$$b = 8,32 + 0,55 \ln s \quad (\text{VIII.14})$$

pour la diffusion proton-proton.

Les sections efficaces totales : On trouvera sur la figure 51a l'allure du comportement des sections efficaces totales pour les différentes particules incidentes en fonction de leur énergie. Abstraction faite du domaine des faibles énergies ($0 - 3 \text{ GeV/c}$) qui fera l'objet d'un paragraphe spécial, on voit sur ces figures que les sections efficaces to-

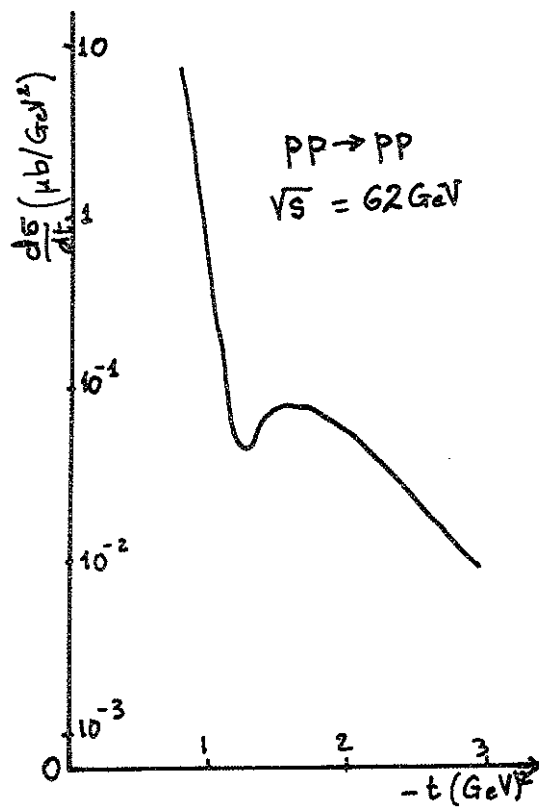


Fig.51. Section efficace différentielle de la diffusion élastique p-p.

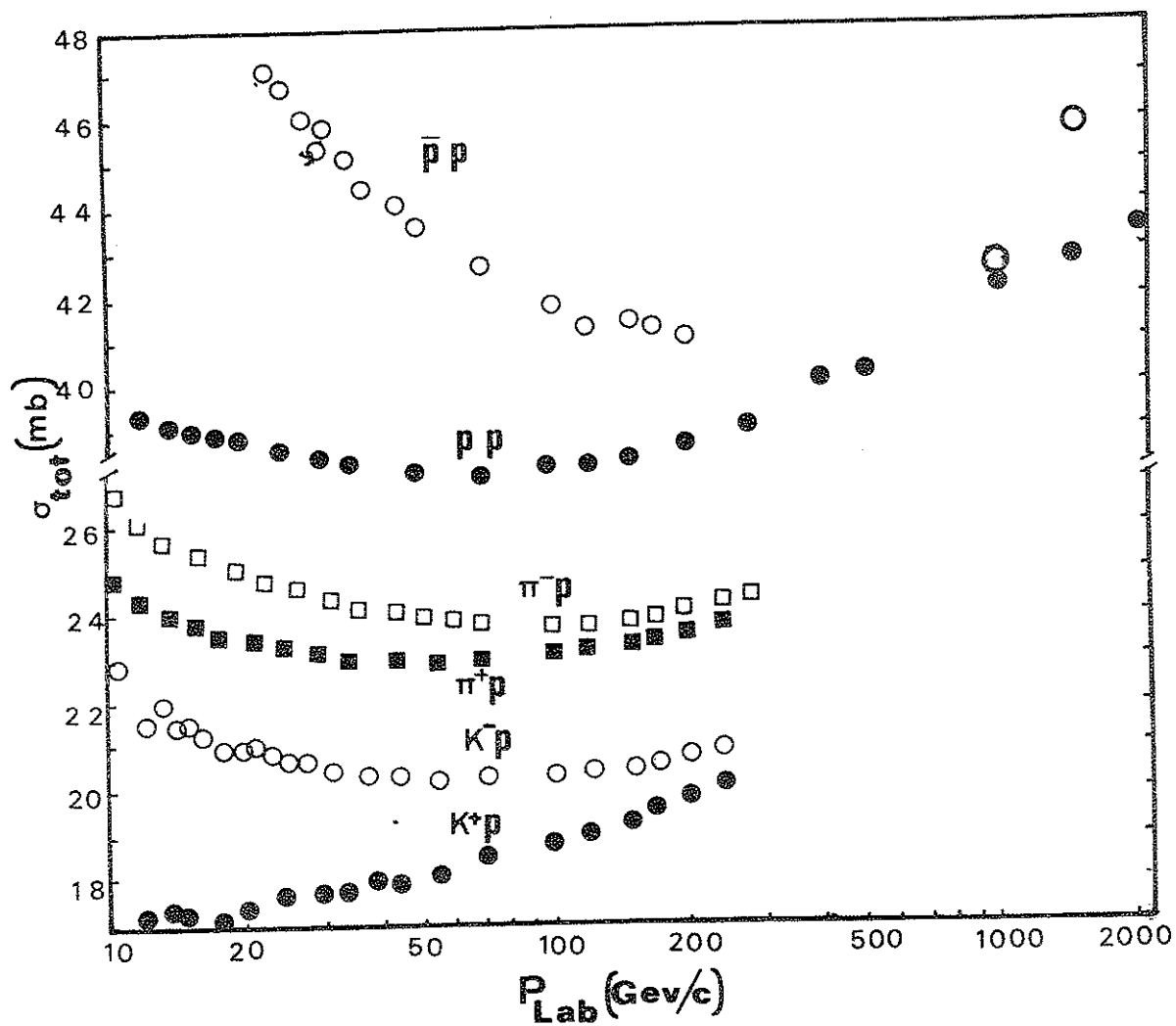


Fig. 51a. Variation de quelques sections efficaces totales avec l'impulsion de la particule incidente.

tales diminuent régulièrement pour des énergies supérieures à 3 GeV et semblent atteindre un plateau vers 30 GeV (section efficace constante). Or, d'après un théorème dû à Pomeranchuk⁽³⁸⁴⁾, aux très hautes énergies les sections efficaces totales deviendraient indépendantes du spin isotopique; on devrait donc avoir les relations :

$$\sigma_{\text{tot}}(\pi^-p) = \sigma_{\text{tot}}(\pi^+p) = \sigma_{\text{tot}}(\pi^0p)$$

(VIII.15)

$$\sigma_{\text{tot}}(pp) = \sigma_{\text{tot}}(pn)$$

etc

Un deuxième théorème du même auteur établit aussi l'égalité des sections efficaces des particules et de leurs antiparticules, c'est-à-dire que l'on aurait aussi :

$$\sigma_{\text{tot}}(pp) = \sigma_{\text{tot}}(p\bar{p})$$

$$\sigma_{\text{tot}}(\bar{n}p) = \sigma_{\text{tot}}(np)$$

$$\sigma_{\text{tot}}(K^-p) = \sigma_{\text{tot}}(K^+p)$$

.

.

etc

(VIII.16)

Dans quelle mesure les théorèmes de Pomeranchuk sont-ils vérifiés par l'expérience ? Il n'est pas facile de se prononcer pour le moment. En effet une des premières surprises de ces dernières années auprès des grands accélérateurs (Serpukhov, Fermi National Laboratory, ISR du Cern) a été de voir que les sections efficaces totales, à l'exception de celle $p\bar{p}$ qui continue à diminuer avec l'énergie, commencent à croître régulièrement (fig. 51); vont-elles se rejoindre, suivant la prophétie de Pomeranchuk ? vont-elles atteindre des plateaux différents pour chaque particule ? Il est difficile de l'affirmer actuellement. Quant au deuxième théorème de Pomeranchuk, la figure 52 reproduit les différences entre les sections

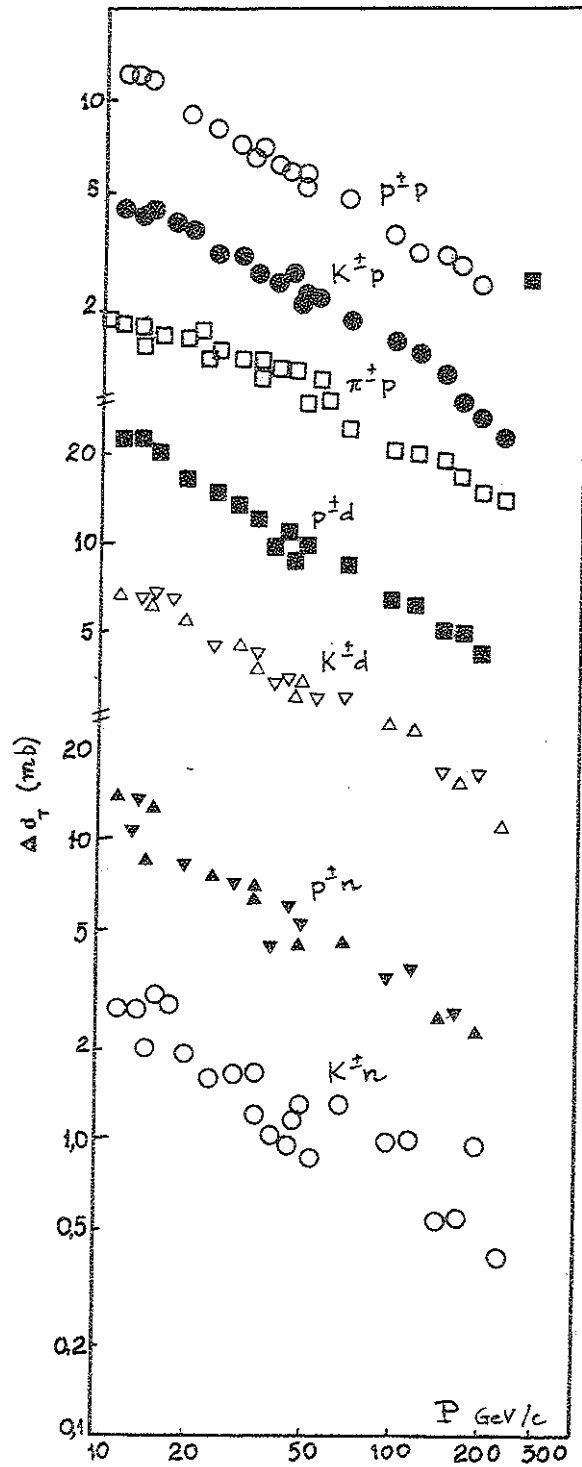


Fig.52 Comportement de la différence des sections efficaces totales particule-anti-particules avec l'impulsion incidente.

efficaces totales particule-antiparticule pour des réactions étudiées jusqu'à 200 GeV/c; on voit que des différences finies existent et décroissent suivant une loi en puissance quand l'énergie augmente. Ces différences vont-elles se maintenir à des énergies plus grandes ? Il est encore trop tôt pour le dire. La dépendance en énergie que montre la figure 51a reflète le fait que la section efficace inélastique croît avec l'énergie, tandis que la section efficace élastique, qui est grande à faible énergie, décroît, puis croît de nouveau. Notons que cette différence entre sections efficaces est de l'ordre de 10%, donc largement supérieure aux erreurs expérimentales. Plusieurs modèles ont été proposés pour essayer de rendre compte de ces différences, mais la situation ne semble pas entièrement claire pour le moment. Il est pourtant intéressant de constater qu'un tel comportement des sections efficaces avait été prévu par les théoriciens bien avant d'être effectivement observé^(385, 386).

Un autre aspect intéressant du comportement des sections efficaces à haute énergie est le fait expérimental que le rapport de la section efficace élastique sur la section efficace totale, semble vouloir atteindre une valeur limite de 0,18 aux énergies actuellement accessibles⁽³⁸⁷⁾; par contre la théorie prédit que ce rapport doit tendre vers zéro (asymptotiquement).

Phénomènes à grand moment transverse : La deuxième surprise des expériences aux ISR du CERN a été la découverte du comportement étrange des collisions p-p à haute énergie en ce qui concerne la production de particules émises à grand angle avec une grande composante de moment transverse p_t . On savait en effet depuis longtemps qu'aux basses énergies (1-10 GeV) le moment transverse des particules diminuait de façon exponentielle et sa valeur moyenne était d'environ $\langle p_t \rangle = 0,33$ GeV/c. Or les expériences aux ISR ont montré qu'il existe un petit nombre de particules, rapidement croissant avec l'énergie, avec des moments transverses considérablement plus grands que ce à quoi on pouvait s'attendre et pouvant atteindre des valeurs de 3 - 5 GeV/c. D'autre part à ces grands p_t , les pions, habituellement prédominants aux petits p_t , perdent ce caractère et il y a de plus un grand excès de pions positifs par rapport aux négatifs ($\sim 40\%$). Finalement la dé-

pendance en énergie du rendement en pions, pratiquement constante aux faibles P_t , croît d'au moins un ordre de grandeur dans le domaine d'énergie accessible aux ISR.

Ce phénomène est d'autant plus important qu'il semble être lié à la structure interne du nucléon (modèle des partons).

Production de particules-Multiplicités : Le grand nombre de particules secondaires produites dans les collisions entre hadrons à grande énergie, fait depuis quelques années l'objet d'un grand nombre de recherches; il est encore prématuré d'en tirer des conclusions définitives. D'une manière générale la multiplicité en particules produites croît avec l'énergie; (linéairement en fonction du logarithme de l'impulsion de la particule incidente entre 50 et 400 GeV/c), et il en est de même pour les particules neutres. La figure 54 montre la distribution du rapport de la multiplicité totale à la multiplicité moyenne pour la collision p-p à 405 GeV/c; la courbe tracée entre les points expérimentaux, est une courbe calculée dans l'hypothèse que ce rapport atteint une limite dite d'invariance d'échelle, suivant laquelle ce rapport tend vers une constante indépendante de l'énergie.

Nous n'insisterons pas davantage sur l'ensemble des phénomènes qui se manifestent aux plus grandes énergies (ISR et rayonnement cosmique) qui sont actuellement étudiés dans plusieurs laboratoires. Pour se tenir au courant des progrès accomplis d'année en année, on consultera avec profit les comptes-rendus des différents congrès internationaux sur la physique des particules ou la physique des hautes énergies, ainsi que les comptes-rendus des nombreux congrès nationaux qui ont lieu dans les différents pays.

Le Courrier du CERN rend compte au fur et à mesure des nouveaux résultats expérimentaux et théoriques d'une manière succincte mais parfaitement claire et abordable .

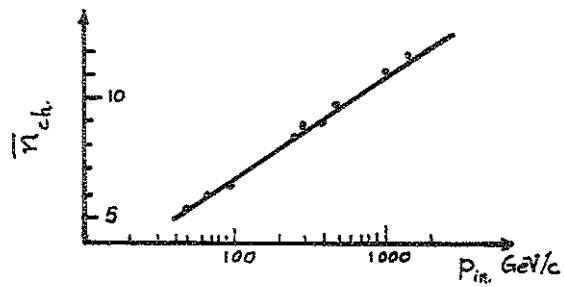


Fig. 53 La multiplicité moyenne en particules chargées en fonction de l'impulsion du proton incident.

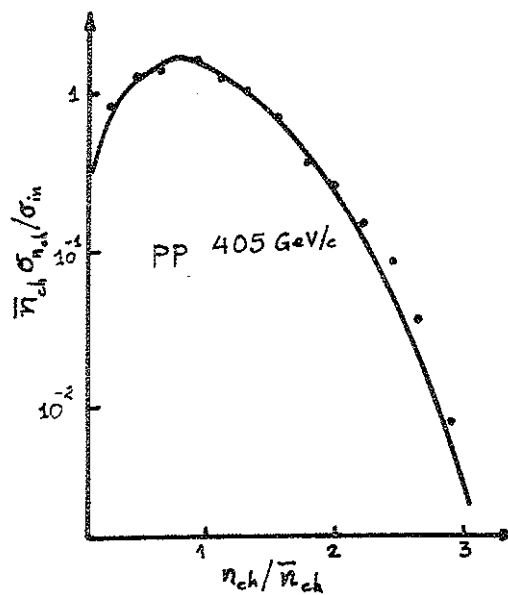


Fig. 54 Distribution du rapport de la multiplicité en particules chargées à la multiplicité moyenne dans l'interaction p-p à 405 GeV/c.

VIII.3 - UNE NOUVELLE VAGUE DE PARTICULES : LES RESONANCES.

Jusqu'à présent nous avons délibérément négligé dans l'étude du comportement des sections efficaces le domaine des basses énergies (inférieures à 3 GeV); il nous faut donc y revenir afin de rendre compte d'une nouvelle classe de phénomènes qui se manifestent plus particulièrement dans ce domaine et qui ont eu pour aboutissement la découverte de toute une variété de particules nouvelles, éminemment instables et encore plus nombreuses que celles dont nous avons déjà parlé.

Ceci nous oblige de revenir une fois de plus en arrière, vers les années 1950, époque à laquelle grâce aux accélérateurs, de nombreuses expériences sont entreprises, principalement aux U.S.A., en vue d'une étude systématique des propriétés des particules et de leurs interactions entre elles et avec la matière.

Sous l'impulsion de Fermi une grande série d'expériences est entreprise à Chicago et à Columbia pour la mesure des sections efficaces pion-nucléon en fonction de l'énergie des pions incidents, mais à l'épo-

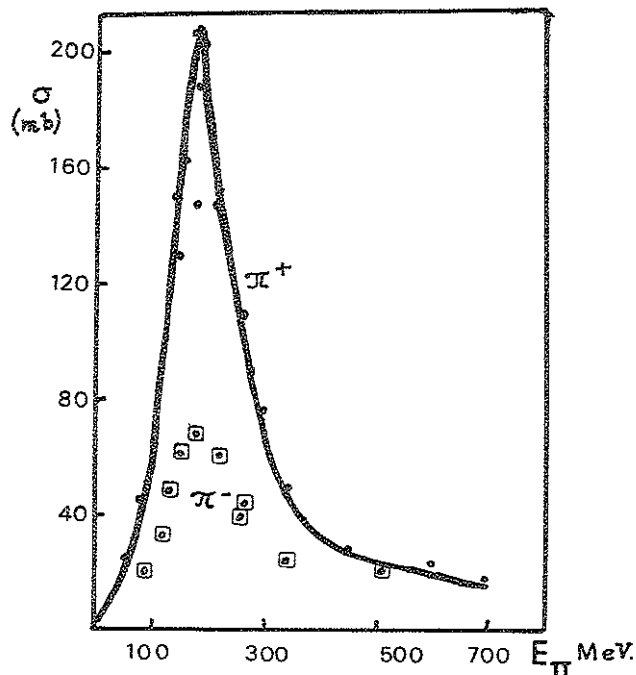


Fig.55 Sections efficaces totales π^\pm -p entre 0 et 700 MeV.

que les énergies des pions étaient sévèrement limitées (135 MeV pour les pions positifs et ~ 200 MeV pour les pions négatifs) d'autre part on ne disposait pas encore de cibles à hydrogène pur. Il a donc bien fallu employer des cibles en matériaux hydrogénés (du genre polyéthylène) et avoir recours à des procédés délicats de soustraction, afin d'atteindre la section efficace sur le nucléon. Malgré ces difficultés (et bien d'autres) les premières expériences de Fermi ont mis en évidence le fait essentiel que la section efficace totale π^\pm -p augmente rapidement avec l'énergie, un phénomène que Fermi a attribué à l'apparition progressive d'un couplage π -p responsable de l'interaction pion-nucléon⁽³⁸⁸⁾. La première tentative d'explication de ces résultats a été proposée aussitôt par Brueckner⁽³⁸⁹⁾ en utilisant la notion d'isobare nucléonique, de spin isotopique $I = 3/2$ et de moment angulaire $J = 3/2$, de la théorie pseudoscalaire de couplage fort de Pauli et Dancoff⁽³⁸²⁾.

Après un travail intensif de plusieurs années, les résultats accumulés par les chercheurs de Chicago⁽³⁹⁰⁾ ont été analysés par Fermi⁽³⁹¹⁾ qui arrivait à les expliquer par un grand déphasage $I = J = 3/2$ ne passant pas par une résonance, accompagné d'un important déphasage de l'onde S vers les énergies les plus grandes. Une exploration générale des sections efficaces de 150 à 750 MeV⁽³⁹²⁾ a par la suite montré l'existence d'un pic bien accusé, rapidement décroissant après 200 MeV, suggérant un comportement de la section efficace du type résonnant, puisqu'il semblait bien approcher de la valeur théorique de la section efficace d'une résonance $I = J = 3/2$ de $2\lambda^2/\pi$ au maximum du pic (fig.55).

Par suite des améliorations apportées au faisceau (forte réduction de la contamination en muons et une bien meilleure résolution en énergie) et de la construction de cibles à hydrogène liquide, les mesures les plus précises dans la région de la résonance^(393,392) et les analyses en déphasages de Bethe et collaborateurs⁽³⁹⁵⁾ ont montré qu'une résonance est effectivement la solution la plus satisfaisante de ce phénomène.

Des résultats analogues ont aussi été obtenus presque simultanément par les chercheurs soviétiques⁽³⁹⁶⁾.

Cette première résonance nucléonique observée a lieu pour une énergie des pions de 195 MeV, ce qui correspond à une masse du système (π -p) de 1236 MeV; on l'a appelée Delta (3,3) afin de mettre en évidence les nombres quantiques I et J (multipliés par 2).

L'exploration systématique du comportement des sections efficaces aux énergies inférieures à 3 GeV, a montré qu'il existe toute une série d'autres résonances dans le système pion-nucléon.

Mais pour le moment (1955) la seule résonance connue est le Delta(3,3); les autres ont été découverts bien plus tard (à partir de 1960), par deux méthodes différentes, dont il sera question plus loin. Personne encore ne se doutait en ce moment du déluge qui allait suivre, sauf peut-être quelques théoriciens à l'imagination débordante.

Mais (honne soit qui mal y pense), comme nous l'avons vu, les théoriciens spéculaient depuis longtemps (\sim 1939) sur la nature de l'interaction pion-nucléon et des forces nucléaires; cependant il était devenu clair aux environs des années 1960 qu'une nouvelle approche des problèmes posés par l'expérience était nécessaire.

Plusieurs théoriciens étaient convaincus que bien des difficultés pouvaient être surmontées en postulant l'existence de bosons vectoriels, se désintégrant en 2 ou plusieurs pions; les expérimentateurs de leur côté ne demandaient pas mieux que de soumettre à l'épreuve cette hypothèse, mais où trouver des cibles de pions pour explorer l'interaction pion-pion? Par quel moyen contourner cette difficulté?

Feynman⁽³⁹⁷⁾ avait depuis longtemps suggéré (encore une idée de théoricien!) un calcul très simple de la masse effective ou masse invariante des particules groupées deux par deux, trois par trois, etc... De même Sakurai⁽³⁹⁸⁾ proposait plus tard le calcul du Q de la réaction de

désintégration d'une particule en deux ou plusieurs autres; une méthode qui revient au même que la précédente. Voici en quoi consiste essentiellement cette méthode :

Considérons une interaction pion-proton donnant lieu à la production de plusieurs particules numérotées de 1 à n (fig. 56) et supposons que la technique de mesure puisse être à même de déterminer la nature et l'impulsion de chacune des particules sortantes :

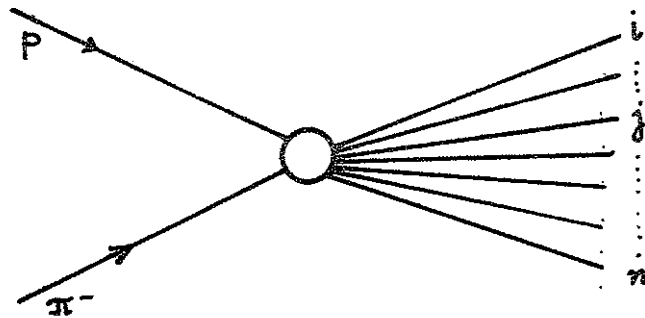


Fig. 56 . Schéma d'une interaction pion-proton, donnant naissance à plusieurs particules secondaires.

supposons de plus que les particules i et j ne sont pas émises indépendamment l'une de l'autre, mais proviennent de la désintégration d'une autre particule (résonance) de masse M_{ij} de vie moyenne τ , très courte ($10^{-23} - 10^{-24}$ s), ayant, au moment de sa production, une impulsion P . Une telle particule est capable de parcourir en moyenne une distance $d = c \tau$ beaucoup trop faible pour être visible (en effet un $c\tau = 2\text{fm}$ correspond à une largeur de la masse de la particule de $\Gamma = h/2\pi\tau \sim 100\text{ MeV}$, tandis qu'il faut disposer d'un parcours d'au moins quelques millimètres pour voir la particule se désintégrer). Calculons alors, suivant la suggestion de Feynman, la masse effective des particules i et j , par la formule :

$$M_{ij}^2 = (E_i + E_j)^2 - (\vec{p}_i + \vec{p}_j)^2$$

puisque les E et les p sont fournis par la mesure, et portons sur un graphique la distribution de cette masse (ou de son carré ou encore de tout autre paramètre équivalent). Si les particules i et j sont indépendantes, cette distribution doit avoir une forme calculable à l'avance (espace de phase); si par contre ces deux (ou trois, etc...) particules proviennent de la désintégration immédiate d'une résonance et si la résolution expérimentale est assez bonne, on doit s'attendre à une accumulation d'événements autour de la valeur de la masse de la présumée résonance, accumulation qui, pour une résolution parfaite (erreurs expérimentales négligeables) doit avoir une largeur directement liée à la vie moyenne de la résonance, par la quatrième relation d'incertitude de Heisenberg.

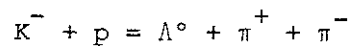
Sans insister davantage sur les nombreux détails techniques mis en oeuvre dans ce genre d'expériences, il ressort de ce qui précède de qu'il y a en principe deux méthodes de recherches des résonances, à savoir :

1) La méthode de formation qui consiste en la mesure systématique de la section efficace totale point par point en fonction de l'énergie, à l'aide de faisceaux d'énergie très bien déterminée; autrement on risquerait de ne pas voir le décrochement de la courbe autour de la résonance, surtout si celle-ci est étroite et si la résolution en énergie n'est pas très bonne.

2) La méthode de production qui consiste à bombarder une cible par un faisceau de particules et à regarder ce qui en sort. On mesure un grand nombre d'événements d'un type bien déterminé et à l'aide de programmes spécialement conçus on calcule différentes quantités cinématiques pour chaque particule sortante et ensuite un autre programme calcule les masses effectives de toutes les combinaisons possibles de ces particules deux par deux, trois par trois, etc; bien entendu, au lieu des masses effectives, on peut aussi calculer d'autres quantités équivalentes.

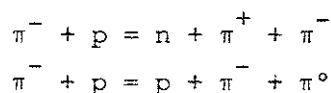
Nous avons vu comment la première méthode est utilisée à propos des isobares nucléoniques. Nous allons illustrer la seconde à l'aide de quelques exemples caractéristiques.

La première résonance découverte par cette deuxième méthode est une résonance baryonique étrange, appelée Y^* , trouvée en 1960 à Berkeley⁽³⁹⁹⁾ à l'aide de la réaction :



Elle avait été prédite par Gell-Mann⁽⁴⁰⁰⁾ par des considérations de "symétrie globale" (même force de couplage pour le système pion-baryon quelle que soit la nature du baryon). D'après une technique, due à Dalitz, on porte sur un diagramme à deux dimensions les carrés des masses effectives $\Lambda\pi^+$ et $\Lambda\pi^-$ (fig. 57); on voit une forte accumulation d'événements sur deux bandes, une horizontale et une verticale, dont les projections sur les axes correspondants donnent immédiatement les carrés des masses des résonances et par conséquent les masses elles-mêmes ainsi que leurs largeurs. Selon la nouvelle nomenclature cette résonance a reçu le nom de résonance Sigma(1385), car, comme la particule Sigma, elle se présente sous la forme d'un triplet du spin isotopique. Sa vie moyenne, calculable à partir de sa largeur, est de l'ordre de $0,6 \cdot 10^{-23}$ s; il s'agit donc d'une désintégration par voie forte. C'est la raison pour laquelle on a appelé stables les particules à vie moyenne relativement longue (10^{-6} à 10^{-10} s) et instables les résonances, dont la vie moyenne est beaucoup plus courte ($\sim 10^{-21}$ à 10^{-23} s).

Une deuxième résonance de nature bosonique a été découverte peu après⁽⁴⁰¹⁾, en étudiant les réactions :



C'est le méson ρ qui se désintègre en deux pions de charge totale +1,0 ou -1. La figure 58 n'est pas la figure originale se rapportant à cette découverte, mais un arrangement spécial qui a l'avantage de

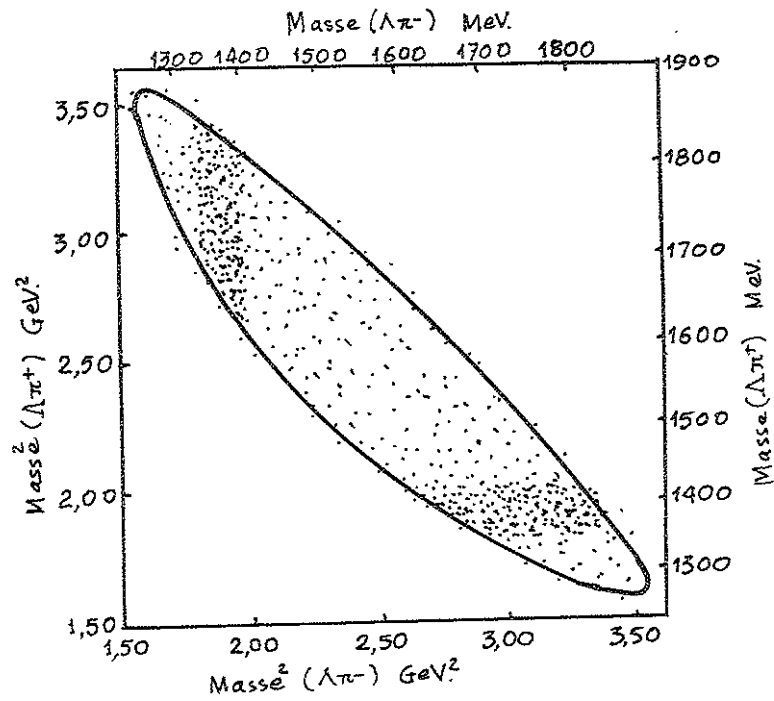
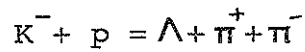


Fig. 57 Diagramme de Dalitz de la réaction



montrant la formation de l'hypéron

Y_1^* (1385).

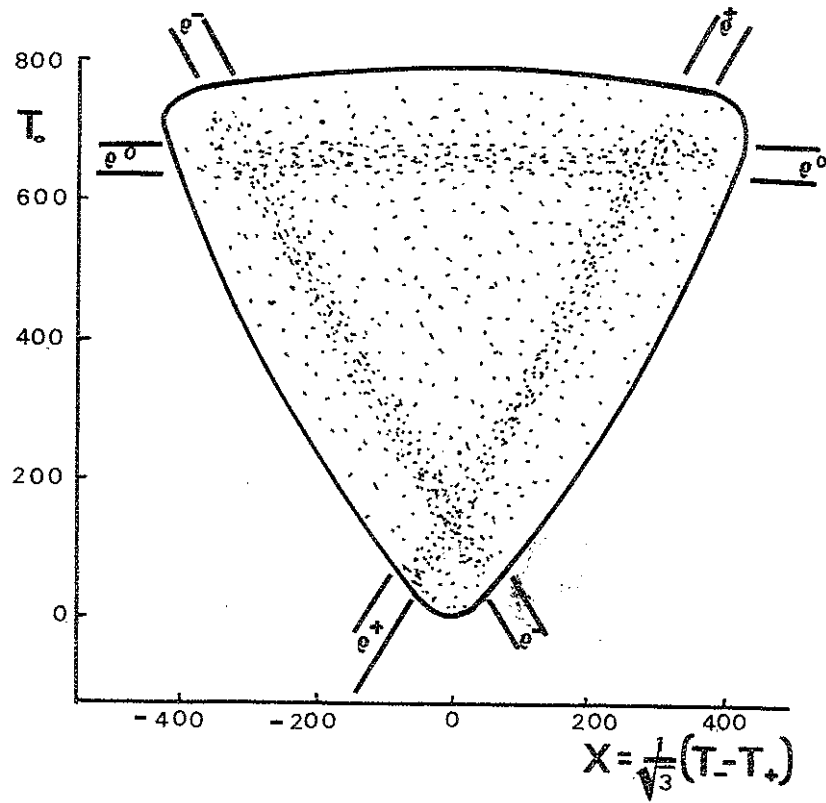


Fig.58 Diagramme de Dalitz montrant la formation du méson rho (En coordonnées les énergies cinétiques des pions du signe correspondant).

montrer la formation simultanée de ces trois états de charge produits dans l'annihilation des antiprotons au repos ⁽⁴⁰²⁾ :

$$p + \bar{p} = \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

Il est intéressant de constater que l'existence d'une telle résonance entre pions avait été envisagée par les théoriciens ^(403,404) bien avant leur découverte expérimentale, soit pour l'interprétation du comportement de la section efficace totale pion-nucléon, soit à propos des facteurs de forme électromagnétiques des nucléons ⁽³⁷⁵⁻³⁷⁷⁾.

La figure 59 est relative à la découverte de la résonance pionique neutre ω qui se désintègre en trois pions de charge totale nulle; elle a été trouvée en étudiant la distribution de la masse effective des trois pions de la réaction d'annihilation ⁽⁴⁰⁵⁾ :

$$p + \bar{p} = \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0$$

Comme il y a plusieurs combinaisons possibles de charge Q :

Q = +1	4 combinaisons du type A
Q = +2	2 combinaisons du type B
Q = 0	4 combinaisons du type C

elles ont été portées sur des graphiques différents. On voit que les combinaisons du type A et B suivent une distribution normale (dite d'espace de phase), tandis que les combinaisons du type C accusent un pic très étroit autour de la valeur de la masse de 800 MeV. Le troisième graphique (D) est une combinaison de (A + B) comparée à (C). La figure fait particulièrement ressortir le rôle du fond continu (espace de phase); en effet seulement 1/4 des combinaisons (C) peut éventuellement, mais pas toujours, former une résonance oméga. L'absence de résonance pour les combinaisons (A) et (B) indique alors que le oméga est un singulet de charge, de spin isotopique I = 0.

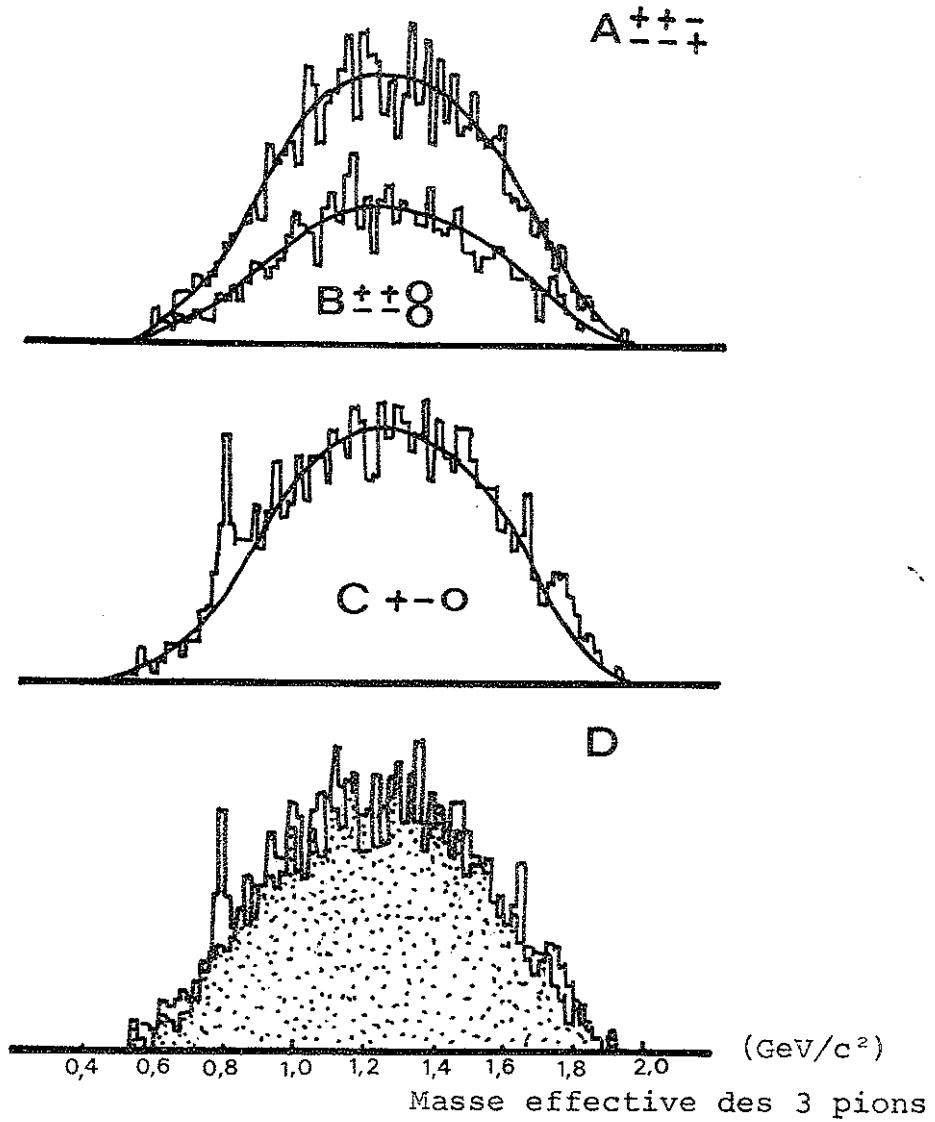


Fig. 59 Première indication sur la formation de la résonance ω^0 .

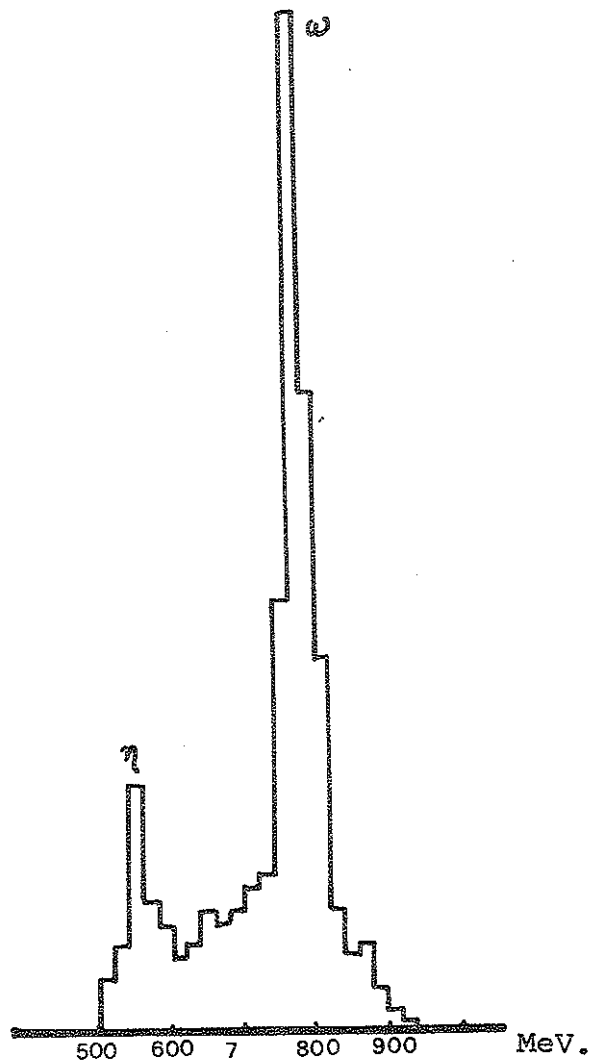
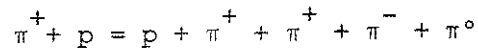
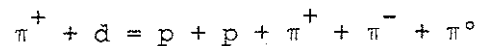


Fig. 60 Formation simultanée de deux résonances η^0 et ω^0 dans la réaction $\pi^+p = p + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$.

Il est clair qu'une réaction peut éventuellement conduire à la formation de plusieurs résonances à la fois; tel est le cas représenté sur la figure 60 se rapportant à la réaction⁽⁴⁰⁶⁾ :



où l'on voit la formation simultanée d'un ω et d'un η ; cette dernière résonance η a été découverte à l'aide de la réaction⁽⁴⁰⁷⁾ :



et se désintègre par voie électromagnétique en trois pions ou en 2 gammas.

Il serait inutile et fastidieux de poursuivre ici la description détaillée des nombreuses résonances découvertes depuis 1960; il en a eu un tel nombre que déjà en 1962, V. Weisskopf, en tirant les conclusions du Congrès International sur la Physique des Hautes Energies, tenu au C.E.R.N. (Genève), s'exclamait ainsi : "avant la dernière conférence de Rochester, il n'y avait ni isobares, ni résonances hypéroniques, ni ω , ni ρ , ni η , sauf dans la tête des théoriciens; depuis lors un monde nouveau a été créé". Quelques 10 ans plus tard, ce monde était tellement peuplé que le nombre des particules dites élémentaires dépassait largement le nombre d'éléments chimiques dans le tableau de Mendéléev. Seule la particule Ω ne résonne pas, mais cela est certainement dû au fait que l'on n'en connaît actuellement que quelques dizaines seulement.

IX. CLASSIFICATION DES PARTICULES

IX.1 - LA NOUVELLE NOMENCLATURE

Durant la première période de l'histoire des particules (1947-1957) on n'en connaissait qu'un nombre restreint (une trentaine) que l'on appelait généralement des particules élémentaires, mais après la découverte des premières résonances et au fur et à mesure que leur nombre allait en croissant, il a paru nécessaire d'introduire une nomenclature nouvelle permettant de grouper ensemble toutes les particules présentant certaines analogies entre elles.

Les considérations ayant conduit à cette nomenclature se basaient sur les différentes lois de conservation et les propriétés de symétrie. En effet la conservation de certaines quantités physiques au cours des différents processus entre particules permet d'attribuer à chacune d'elles un ensemble de nombres quantiques qui sont généralement des entiers ou demi-entiers et qui sont conservés par certaines interactions et violés par d'autres, comme on peut le voir à l'aide du tableau suivant, où les quantités conservées sont désignées par signe + et les quantités non conservées par un signe - .

TABLE VII

Quantité physique	Symbole	Nb. quantique correspondant	Interaction		
			forte	é.m.	faible
Energie-impulsion	E,p		+	+	+
Moment angulaire	J	0,1/2;1,3/2....	+	+	+
Charge électrique	Q	entier	+	+	+
Parité	P	± 1	+	+	-
Conjug. de charge	C	± 1	+	+	-
Nombre baryonique	B	entier	+	+	+
Isospin	I	0,1/2,1,3/2....	+	-	-
Hypercharge	Y	entier	+	+	-

La nouvelle nomenclature est basée sur les trois derniers nombres quantiques (encadrés dans la table) B, I et Y et attribue un symbole spécial à chaque combinaison de ces trois nombres⁽⁴⁰⁸⁾ :

Pour les mésons les symboles sont :

η	pour la combinaison	$B = Y = I = 0$
π	"	" $B = Y = 0, I = 1$
κ	"	" $B = 0, Y = 1, I = 1/2$

Pour les baryons on a de même l'attribution suivante :

Λ	pour la combinaison	$B = 1, Y = I = 0$
Σ	"	" $B = 1, Y = 1, I = 1$
N	"	" $B = 1, Y = 1, I = 1/2$
Ξ	"	" $B = 1, Y = -1, I = 1/2$
Ω	"	" $B = 1, Y = 2, I = 0$
Δ	"	" $B = 1, Y = 1, I = 3/2$

Comme nous l'avons déjà vu la multiplicité à l'intérieur de chaque combinaison est de $2I + 1$ particules; il y a donc 2 particules N, 4 particules Δ , etc.

Cela étant on peut envisager maintenant les différentes tentatives de classification de toutes les particules, y compris les résonances.

IX.2 - LES POLES ET TRAJECTOIRES DE REGGE

La première notion utilisée pour une classification des particules remonte à une époque (1959) où les résonances étaient encore inconnues et repose sur une relation entre la masse et le moment angulaire de spin des particules, introduite par T. Regge⁽⁴⁰⁹⁾.

Malgré le fait bien connu en mécanique quantique que le moment angulaire ne peut prendre que des valeurs discrètes (entières ou demi-entières)

res), Regge eut l'idée d'étudier le comportement des amplitudes de diffusion entre particules (sections efficaces) pour des valeurs continues et complexes de cette variable. Il n'est pas possible d'entrer ici dans les détails trop mathématiques de ce traitement; l'idée conductrice est que chaque amplitude est une fonction analytique sur le plan complexe du moment angulaire, excepté en des points singuliers, dits pôles de Regge, dont la position sur le plan complexe J varie avec l'énergie en décrivant ainsi une certaine courbe, appelée trajectoire de Regge. Chaque fois que la valeur de la partie réelle du pôle passe par une valeur physique de J , atteinte pour une valeur bien déterminée de l'énergie E_R , cela correspond à un état lié du système en interaction si cette énergie est négative, et à une résonance si l'énergie est positive. Plusieurs états (liés ou résonances) se trouvant sur une même trajectoire, constituent ce que l'on appelle une famille, dont tous les membres ont les mêmes nombres quantiques internes (charge, isospin, étrangeté, etc) à l'exception du moment angulaire J qui prend des valeurs consécutives différant de deux unités ($\Delta J = 2$).

L'état le plus bas porte le nom d'occurrence de Regge, les états supérieurs, espacés de 2 unités de J , sont des réurrences de Regge et il en existe théoriquement une infinité (fig. 61) .

Cette méthode offre donc une possibilité commode de classement des particules suivant les valeurs du moment angulaire, tous les autres nombres quantiques étant les mêmes. Une propriété importante d'une trajectoire de Regge est sa signature, nouveau nombre quantique qui prend les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \tau &= (-1)^J \text{ pour les bosons (} J \text{ pair ou impair)} \\ \tau &= (-1)^{J-1/2} \text{ pour les fermions (} J \text{ demi-entier impair).} \end{aligned}$$

Le classement des fermions, un peu plus compliqué que celui des bosons, dépend aussi de la parité; on distingue 4 catégories de trajectoires :

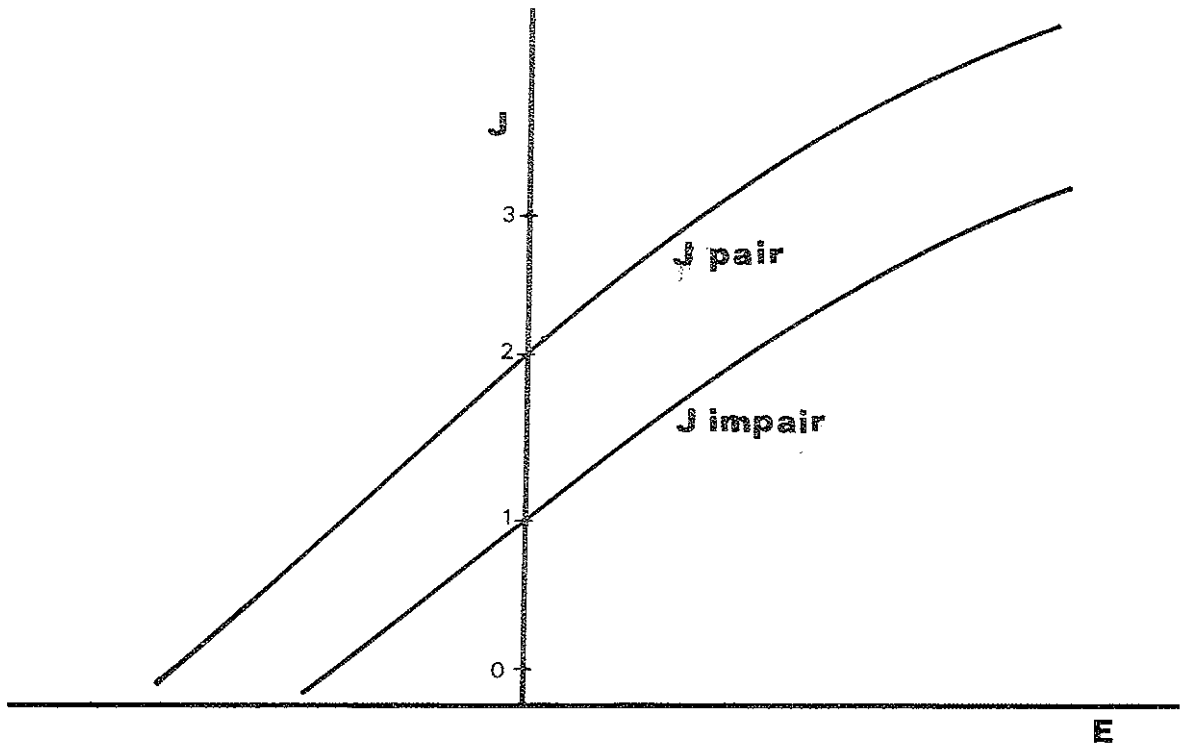


Fig.61 Trajectoires de Regge (schématique).

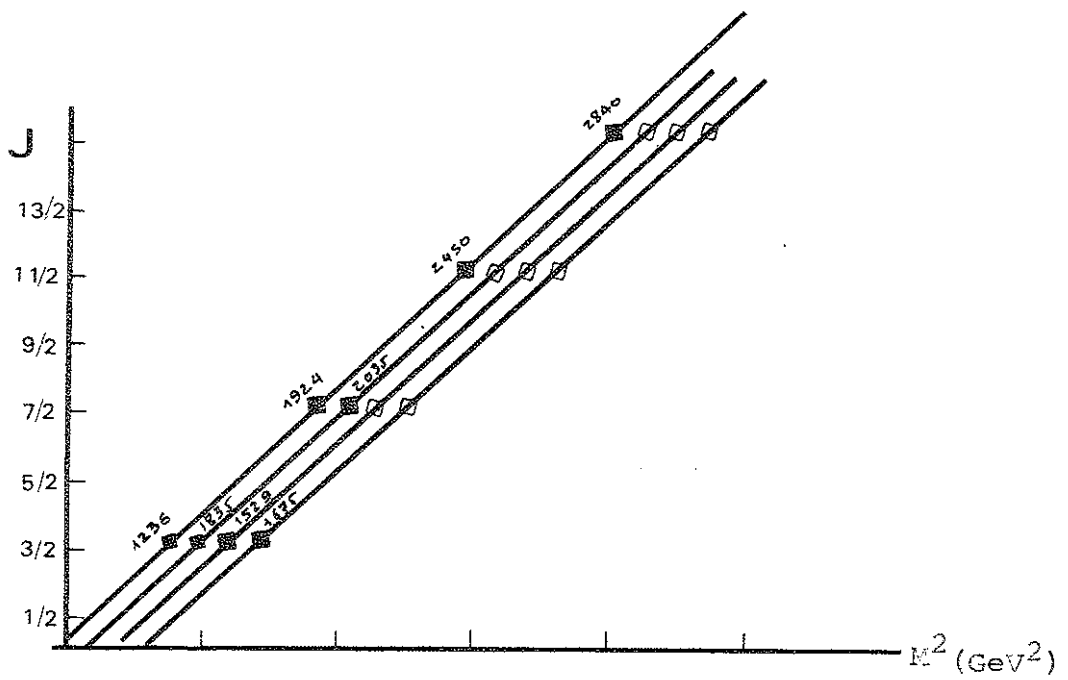


Fig. 62 Trajectoires de Regge des baryons Delta.

Trajectoire α , $\tau = +1$	$J^P = (1/2)^+, (5/2)^+, (9/2)^+ \dots$
" β , $= +1$	$= (1/2)^-, (5/2)^-, (9/2)^- \dots$
" γ , $= -1$	$= (3/2)^-, (7/2)^-, (11/2)^- \dots$
" δ , $= -1$	$= (3/2)^+, (7/2)^+, (11/2)^+ \dots$

La figure 62 montre la trajectoire la mieux connue des baryons Delta ($Y = 1, I = 3/2$) ainsi que les trajectoires plus incomplètes des Sigma ($Y = 0, I = 1$), des Ksi ($Y = -1, I = 1/2$) et des Oméga ($Y = -2, I = 0$); les cercles pleins représentent des particules connues, les cercles blancs sont des prévisions de la théorie.

Des trajectoires analogues existent pour toutes les autres particules, mésons et baryons; elles présentent l'agréable aspect de lignes droites (pente constante).

Non moins remarquable est le fait que dans le plan (J, t), où t est le 4-moment transféré, toutes les trajectoires de Regge semblent couper l'axe J à l'origine ($t=0$) pour des valeurs de J inférieures à 1 et il doit exister, semble-t-il, une trajectoire d'ordonnée à l'origine 1; c'est la trajectoire la plus haute, correspondant aux nombres quantiques du vide ou trajectoire de Pomeranchuk, décrite par une particule imaginaire, le poméron.

Pour les nombreux développements de la méthode de Regge et leurs applications aussi bien théoriques que pour le traitement des données expérimentales, il existe une très abondante littérature; pour une première orientation on peut consulter avec profit les références (410-413).

IX.3 - LA VOIE OCTUPLE, SYMETRIE SU(3).

Un autre schéma de classification des particules qui a connu un grand succès, à cause de ses prévisions spectaculaires, a été développé simultanément et indépendamment en 1961 par Gell-Mann et Ne'eman⁽⁴¹⁴⁾; il est basé sur une relation entre particules de même spin-parité (J^P) mais avec des valeurs différentes de masse, de spin isotopique et d'hypercharge.

On se rappelle que la notion d'isospin avait permis de classer les particules en multiplets contenant $2I + 1$ membres, mais la symétrie $(SU)_2$ à laquelle obéit cette variable n'est qu'une symétrie approchée; elle est, par exemple, violée par l'interaction électromagnétique, dont l'intervention permet de distinguer entre neutron et proton par une faible différence de masse, et il en est de même pour les différents autres multiplets du spin isotopique. On attribue donc ce clivage des masses à l'intérieur d'un même multiplet à la violation de la symétrie $SU(2)$ par l'interaction électromagnétique. Si maintenant on regarde la famille des baryons de même spin-parité, comme la famille $(N, \Lambda, \Sigma, \Xi)$ de $J^P = 1/2^+$, on voit que les différences de masse sont bien plus importantes. D'où l'idée qu'une loi de conservation, autre que celle de l'isospin, violée par l'interaction forte, serait capable de grouper ensemble en un supermultiplet les multiplets baryoniques de même J^P et des valeurs différentes de l'isospin et de l'hypercharge. La rupture de cette symétrie par l'interaction forte pourrait alors expliquer les différences de masse à l'intérieur d'un même supermultiplet, par un clivage analogue à celui provoqué par l'interaction électromagnétique à l'intérieur d'un multiplet d'isospin. Il s'agissait donc de rechercher quelle pourrait être cette loi de conservation ainsi que le mécanisme de sa violation.

On a mis environ 8 ans pour découvrir cette symétrie qui met en jeu 8 nombres quantiques en même temps qu'elle rappelle un aphorisme de Buddha : "Ô moines, la seule vérité noble, qui mène à l'abolition de la souffrance, est la noble Voie Octuple, à savoir celle de l'opinion juste, de l'intention juste, de la parole juste, de l'action juste, de la vie juste, de l'effort juste, de l'esprit juste, de la concentration juste"⁽⁴⁰⁸⁾. C'est la symétrie $SU(3)$, une extension de $SU(2)$, dont un modèle est la Voie Octuple (Eighfold Way).

Du point de vue mathématique elle est basée sur la puissante théorie des groupes de Lie et plus particulièrement sur le groupe unitaire spécial (unimodulaire) à 3 dimensions, d'où son nom. C'est un groupe comportant 8 opérateurs (8 matrices unitaires 3×3 dépendant de 8 paramètres

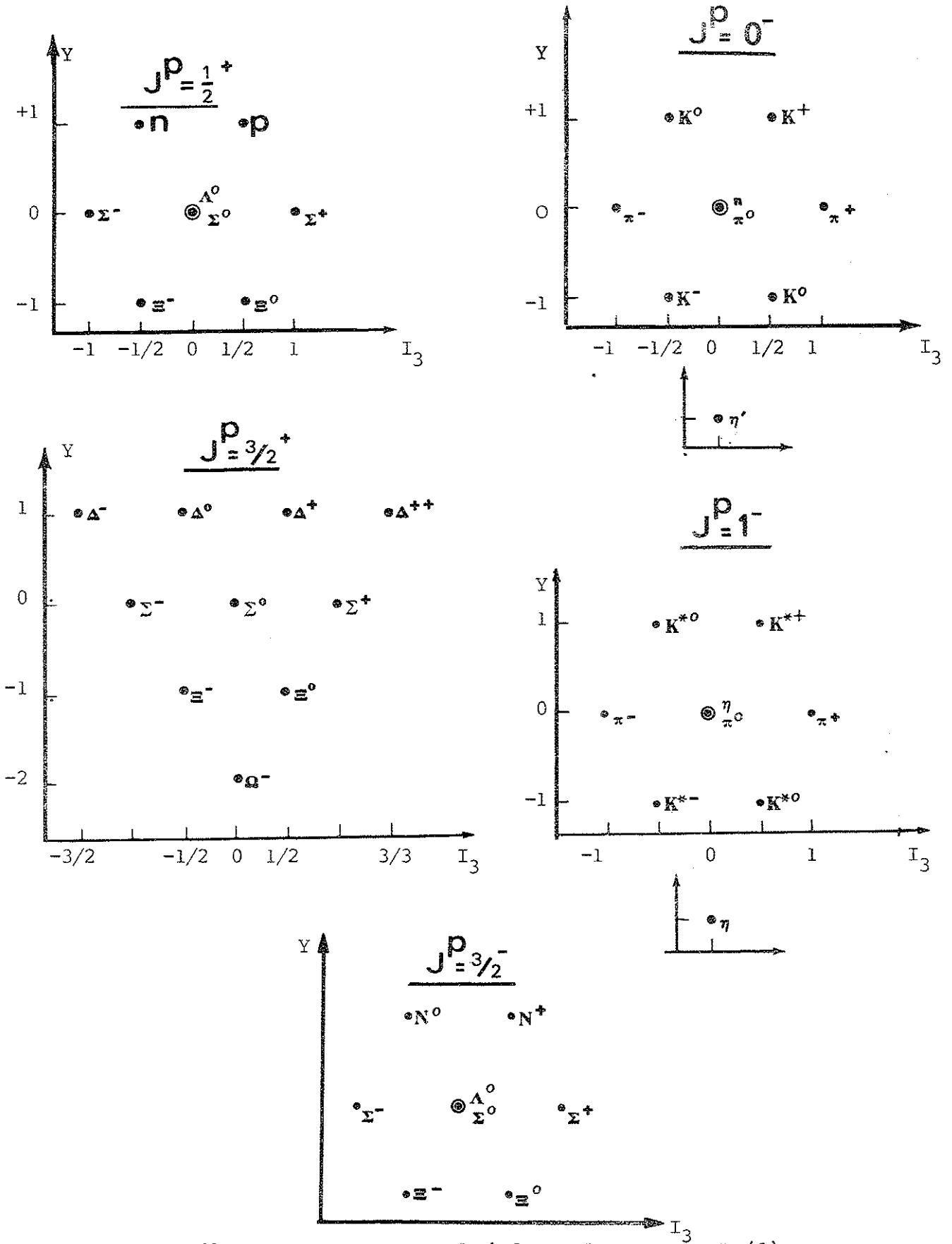


Fig.63 Quelques supermultiplets du groupe $SU(3)$

réels) et de rang 2 (deux générateurs simultanément diagonalisables). Comme pour l'isospin, on définit une nouvelle variable, le "spin unitaire" F à 8 composantes (I_1, I_2, I_3, Y , U-spin et V-spin chacun à 2 composantes). Nous connaissons l'action de chacun des quatre premiers opérateurs; quant aux deux autres, le V-spin a pour effet de transformer un proton en Lambda (changement d'étrangeté), le U-spin transforme un neutron en Lambda (changement d'étrangeté); ces deux opérateurs modifient à la fois Y, I et Q. C'est la violation de deux nouveaux spins qui est responsable du clivage de masse dans un supermultiplet, suivant la formule, connue sous le nom de formule de Gell-Mann et Okubo :

$$m = m_0 + m_1 \cdot Y + m_2 (I(I+1) - Y^2/4) \quad (\text{IX}, 1)$$

Le groupe SU(3) possède plusieurs représentations :

$$1, 3, \bar{3}, 6, \bar{6}, 8, 8', 10, \bar{10}, \dots$$

mais le modèle de la voie octuple n'en utilise qu'un nombre restreint (1, 8, 10 et $\bar{10}$).

Effectivement le premier succès de la voie octuple a été le classement des 8 baryons N, Λ , Σ , Ξ de $J^P = (1/2)^+$ dans la représentation 8 qui est la représentation régulière de SU(3) (fig. 63).

Dans ce cas précis la formule de Gell-Mann-Okubo donne :

$$1/2(m_N + m_{\Xi}) = 1/4(3m_{\Lambda} + m_{\Sigma})$$

une relation qui est vérifiée à 0,5% près !

Comme il est souvent utile de connaître le contenu en isospin et hypercharge d'une représentation, le tableau suivant donne ce contenu pour les représentations les plus usitées.

TABLE VIII
contenu en isospin et hypercharge de SU(3)

[1]	$(I, Y) = (0, 0)$
[8]	$(I, Y) = (\frac{1}{2}, +1), (0, 0), (1, 0), (\frac{1}{2}, -1)$
[10]	$(I, Y) = (\frac{3}{2}, +1), (1, 0), (\frac{1}{2}, -1), (0, -2)$
$\overline{[10]}$	$(I, Y) = (0, +2), (\frac{1}{2}, +1), (1, 0), (\frac{3}{2}, -1)$
[27]	$(I, Y) = (1, +2), (\frac{1}{2}, +1), (\frac{3}{2}, +1), (0, 0), (1, 0), (2, 0), (\frac{1}{2}, -1),$ $(\frac{3}{2}, -1), (1, -2);$

Ce premier succès obtenu avec l'octet baryonique a incité à en chercher d'autres, en particulier pour les mésons. Or à cette époque (1961) on ne connaissait que 7 mésons (pions et kaons) de $J^P = 0^-$; il en manquait un, pour compléter un octet, qui devait avoir une masse d'environ 563 MeV. Il a été découvert au cours de l'année et il avait une masse de 548 MeV et un $J^P = 0^-$, comme prévu.

Signalons à cette occasion que la formule de masse pour les mésons, valable en termes des carrés des masses, donne :

$$1/4(m_\pi^2 + 3m_\eta^2) = m_K^2$$

La situation était analogue pour les mésons à $J^P = 1^-$; il en manquait un de masse 925 MeV. On a découvert plus tard un tel méson, mais sa masse était beaucoup trop faible, 782 MeV. La règle des masses semblait donc être en défaut. Heureusement, dans le cas des mésons 1^- , il existe la possibilité d'une particule à l'état singulet, avec $Y = I = 0$; si sa masse était voisine de 925 MeV, seule une violation de la symétrie pourrait distinguer cette particule du singulet de celle de l'octet (crise d'identité) ⁽⁴⁰⁸⁾ qui doit avoir pratiquement les mêmes propriétés. Une telle particule a effectivement été découverte en 1962, elle avait une masse de 1020 MeV.

Un troisième octet mésonique 2^+ a été complété plus tard.

Pour le moment la situation paraissait plus compliquée pour les autres baryons à cause des lacunes (particules non encore observées); néanmoins la voie octuple a enregistré un grand succès avec les baryons de $J^P = (3/2)^+$; en effet la plus ancienne résonance connue, le Delta (1236), comportant 4 membres, ne pouvait appartenir ni à un singulet, ni à un octet; par contre la représentation 10 de SU(3) pouvait bien s'accomoder du quartet Delta, du triplet Sigma et du doublet Ksi, mais (heureusement ?) il manquait un singulet Oméga, de masse 1676 MeV. Sa découverte ultérieure (avec une masse de 1672,2 MeV) fut un des succès le plus spectaculaire de ce modèle.

Rappelons que pour la représentation 10 la formule de masse se réduit à une forme linéaire :

$$m = m_0 + m_1 \cdot Y \quad (\text{IX.2})$$

d'où résulte un espacement constant des masses à l'intérieur du décuplet.

Ainsi le modèle de la Voie Octuple aboutissait à un classement élégant et satisfaisant des particules à interaction forte en octets et décuplets dans lequel avaient trouvé place toutes les particules connues, y compris les résonances; il était en même temps possible de faire un certain nombre de prédictions importantes.

En effet si toutes les particules obéissaient bien à un classement en supermultiplets de SU(3), il devenait possible de prédire l'existence d'autres particules d'un supermultiplet, une fois qu'un seul membre du supermultiplet venait d'être découvert, puisque, en principe, tous les autres membres devraient exister. De plus le modèle était capable de calculer les vitesses de désintégration (largeur) des résonances appartenant à

un même multiplet, grâce à certaines règles de couplage (coefficients de Clebsch-Gordan), ainsi que des relations entre les sections efficaces des réactions entre membres d'un multiplet, et de formuler aussi certaines règles de sélection.

On remarquera certaines différences entre les octets mésiques (de nombre baryonique $B = 0$) et les octets baryoniques ($B = 1$). Tous les mésons appartiennent soit à des singulets, soit à des octets, mais un même octet contient aussi bien les particules que les antiparticules, tandis qu'il existe des octets distincts de baryons et d'antibaryons. En outre, s'il existe plusieurs multiplets $SU(3)$ de même J^P et B , les membres de deux multiplets ayant les mêmes I , I_3 et Y , sont mélangés par l'interaction qui viole la symétrie (interaction semi-forte); ainsi le singulet mésonique à $I = Y = 0$ et le membre de l'octet de $I = Y = 0$ se mélangent pour donner un nouvel état, comme le η et le ϕ . De cette façon l'octet mésonique 1^- peut être considéré comme un nonet plutôt qu'un singulet et un octet séparés, appartenant à une représentation réductible de $SU(3)$.

Les auteurs de la référence⁽⁴⁰⁸⁾ ont de plus formulé une remarque prophétique, suivant laquelle "le jeu des symétries peut ne pas être encore terminé pour les particules à interaction forte; il est possible qu'il existe en plus un autre nombre quantique, non encore découvert, qui est conservé dans les interactions fortes et a la valeur zéro pour toutes les particules connues... Les expériences à très haute énergie, avec la nouvelle génération d'accélérateurs, pourrait conduire à une situation analogue pour un nombre quantique entièrement nouveau". Ce sera le charme, 10 ans plus tard revenu à l'ordre du jour.

En attendant et devant le déluge de particules, dont le nombre augmente considérablement d'année en année, les physiciens commencent à se poser des questions sur la notion même de l'éléментарité. Y a-t-il dans cette liste impressionnante des particules plus élémentaires ou plus fondamentales que d'autres, ou bien faut-il considérer qu'elles peuvent toutes être regardées sur un pied d'égalité ? En plus clair y-a-t-il une aristo-

cratie de particules ou bien est-ce la démocratie totale ?

IX.4 - UN CERCLE VICIEUX, le BOOTSTRAP (où l'on tire sur ses lacets pour s'élever en l'air).

La première tendance fut en faveur de la démocratie, avec Chew, Frautschi, Mandelstam et d'autres. Le premier argument d'ailleurs est sorti de la spectroscopie des particules : les leptons ont des masses très faibles (0-100 MeV) par rapport aux hadrons, dont le plus léger a une masse de 135 MeV et il en existe dont la masse est plus grande que 1000 MeV. D'où l'idée défendue par Chew que les hadrons (particules à interaction forte) sont en un certain sens des structures dynamiques qui doivent leur existence aux forces par lesquelles elles entrent en interaction mutuellement, forces qui font défaut chez les leptons avec leurs masses bizarres.

Le deuxième argument en faveur de la démocratie subnucléaire est de nature théorique et consiste, grosso modo, à pousser à ses conséquences extrêmes les propriétés mathématiques d'analyticité des amplitudes de diffusion entre particules (sections efficaces). On arrive ainsi à la conclusion qu'il n'existe pas de particules plus élémentaires que d'autres, mais toutes doivent être considérées comme des objets composites, dans ce sens que toutes les particules que l'on observe effectivement dans la nature sont composées les unes à partir des autres par un processus se refermant sur lui-même (la boucle a bouclé). Prenons en un exemple :

La réaction de diffusion :

$$n + p = n + p \quad (a)$$

peut être décrite par une amplitude $A(s,t,u)$ mais cette même fonction décrit aussi la réaction croisée :

$$n + \bar{n} = p + \bar{p} \quad (b)$$

c'est-à-dire que si l'on connaît l'amplitude pour la réaction (a), on peut

calculer celle de la réaction (b). Ces deux réactions sont équivalentes (fig. 64).

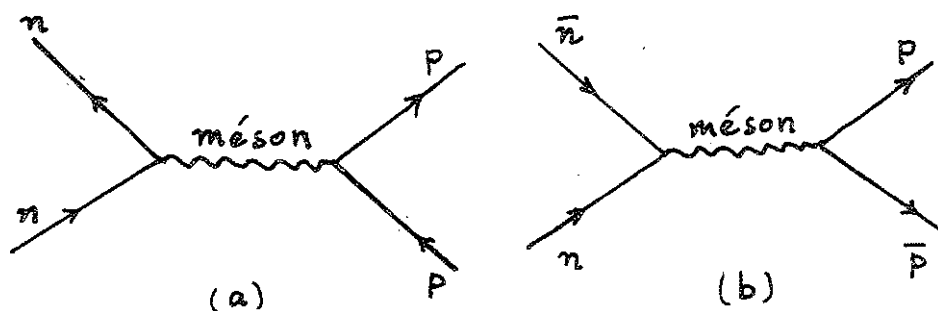


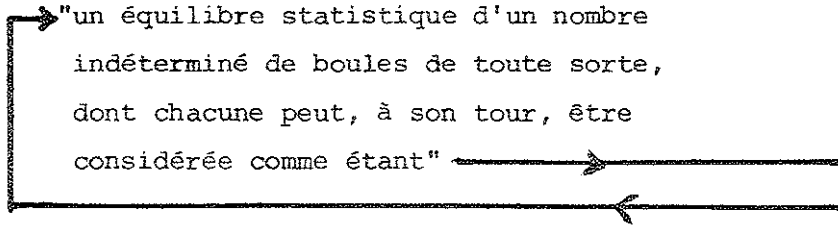
Figure 64

Mais les deux diagrammes (a) et (b) ont des interprétations différentes : dans le premier il y a, entre les deux particules incidentes n et p , échange d'un méson (neutre) qui est responsable de la force entre ces particules (force de Yukawa) et forme un pont entre les particules entrantes et sortantes. Dans le diagramme (b) cette même particule neutre (méson) provient de la combinaison (virtuelle) des deux particules entrantes, n et \bar{n} , et constitue un état intermédiaire faisant communiquer les deux membres de la réaction.

Ainsi, suivant la philosophie du Bootstrap, aucune particule n'est élémentaire, "chacune aide à générer les autres qui, à leur tour, lui donnent naissance " (408,415).

La notion de bootstrap a été utilisée par R. Hagedorn⁽⁴¹⁶⁾ pour l'élaboration d'un modèle thermodynamique de la matière hadronique aux hautes énergies. Très schématiquement la collision entre deux particules de haute énergie conduit à l'intérieur d'un certain volume élémentaire à un état que l'on peut décrire comme une boîte noire (corps noir) ou "boule de feu" de matière hadronique.

Une telle boule est



C'est un état fortement excité qui au bout de 10^{-23} s se désintègre en donnant tout un spectre de hadrons dont la forme tend vers la forme limite :

$$\rho(m) = C \cdot \exp(m/T_0) (1/m)^{5/2} \quad (\text{IX.3})$$

où T_0 est la plus haute température possible ou température d'ébullition du fluide hadronique (de l'ordre de 160 MeV ou $2 \cdot 10^{12}$ °K).

Tout nouvel apport d'énergie dans la boule de feu n'a pour effet que l'augmentation de la température du fluide T tant que $T < T_0$ qui est une température limite (constante universelle). Il s'agit donc d'une sorte de bootstrap asymptotique. Notons que ce modèle reproduit d'une façon satisfaisante bien des données expérimentales.

De toute façon et malgré le grand nombre de travaux que le modèle de bootstrap a suscité, "l'idée, quoique fascinante et utile, est une idée non-scientifique"⁽⁴¹⁷⁾ et, partant, "incomplète et temporaire", du fait que nous ne possédons pas de confirmations expérimentales. La théorie exige, en effet, que toutes les particules (les leptons mis à part), correspondent à des pôles de Regge, ce qui est loin d'être évident pour le moment. Certes beaucoup de baryons semblent pouvoir se classer comme des recurrences de Regge, mais la situation est bien moins claire dans le cas des bosons ; on ne connaît par exemple aucune recurrence du pion.

Une philosophie opposée au bootstrap (un anti-bootstrap en somme) est celle des fondamentalistes qui pensent que toutes les particules sont constituées à partir d'un petit nombre d'entités fondamentales, les quarks, dont il sera question dans un instant, ou bien la théorie développée par W. Heinsenber⁽⁴¹⁸⁾ d'un champ fondamental unique qui, malheureusement, ne serait pas accessible à une mesure directe.

La question de la "démocratie" ou bien de l'"aristocratie" dans le domaine des particules n'est donc pas encore tranchée, mais il semble que Chew⁽⁴¹⁹⁾ est très optimiste à cet égard : "c'est seulement quand les fondamentalistes n'arriveront pas à expliquer plus d'une partie du spectre des hadrons qu'ils accepteront graduellement le modèle cohérent des bootstrappers".

IX.5 - LE MODELE DES QUARKS

L'industrie des modèles a connu une grande expansion depuis la découverte des pions et il en existe un nombre considérable. La première tentative dans cette direction est celle de Fermi et Yang⁽⁴²⁰⁾ qui ont proposé un modèle suivant lequel les hadrons seraient des états liés nucléon-antinuécléon ($\pi^0 = n\bar{n}$, $\pi^+ = \bar{n}p$, $\pi^- = n\bar{p}$). Mais ce modèle ne pouvait pas rendre compte des particules étranges et a dû être abandonné. S. Sakata⁽⁴²¹⁾ a alors introduit un nouvel élément de symétrie, en proposant comme particules de base un triplet fondamental, constitué des trois particules physiques proton, neutron et lambda, appelé sakaton, ainsi que son conjugué de charge, l'antisakaton ($\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$), qui possèdent les bons nombres quantiques pour construire les autres hadrons :

$$\pi^+ = \bar{n}p, \quad K^+ = p\bar{\Lambda}, \quad K^0 = n\bar{\Lambda}, \quad \Sigma^+ = p\bar{n}\bar{\Lambda}, \quad \text{etc}$$

Ce modèle s'est aussi heurté à des difficultés à propos des baryons, car il prévoyait de nombreux états qui n'existent pas dans la nature. Il a donc été abandonné après les grands succès enregistrés par la Voie Octuple, dont il a été déjà question.

Mais Gell-Mann était en train de réfléchir sur une compréhension plus profonde du groupe SU(3), dont nous avons vu que la représentation fondamentale 3 était vide, c'est-à-dire qu'elle ne contenait aucune particule connue. Il a alors songé à remplir cette représentation 3, ainsi que sa conjuguée $\bar{3}$, à l'aide d'un triplet fondamental de trois quarks u, d et s, à partir desquels seraient formés tous les hadrons⁽⁴²²⁾, et cela malgré la nature purement imaginaire des quarks eux-mêmes. Les nombres quantiques des quarks sont donnés dans la table suivante :

TABLE IX. Les nombres quantiques des quarks

Symboles	I	I ₃	S	B	Y	Q
p ou u	1/2	1/2	0	1/3	1/3	2/3
n ou d	1/2	-1/2	0	1/3	1/3	-1/3
λ ou s	0	0	-1	1/3	-2/3	-1/3

Les antiquarks ont des nombres quantiques opposés.

Il est à remarquer que les nombres quantiques B, Y et Q des quarks sont tous fractionnaires, il en faut donc au moins deux pour faire un méson et au moins trois pour un baryon.

Un modèle équivalent élaboré par Zweig⁽⁴²³⁾, appelle aces les trois entités de base.

Qu'il s'agisse de quarks ou d'aces, comme les mésons ont un nombre baryonique B=0, la construction d'un méson nécessite un quark et un antiquark ; par contre pour les baryons B = 1, et il faut trois quarks. Mais avant de discuter le jeu de cette construction, il serait utile d'exposer celui de la construction des différentes représentations de SU(3).

Les trois quarks sont placés, comme nous l'avons déjà dit, dans la représentation 3, les trois antiquarks, dans la représentation $\bar{3}$ et à l'aide de la table on construit les deux figures :

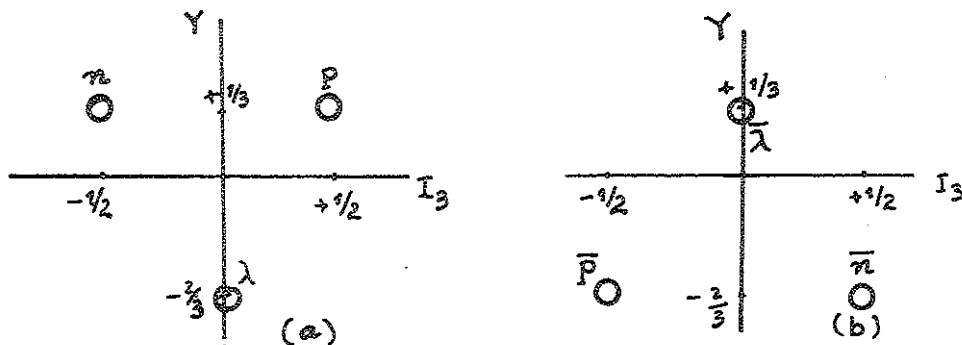


Fig.65

Du point de vue de l'étrangeté le quark lambda est étrange, mais, d'une certaine façon, on peut aussi considérer comme étranges les quarks p

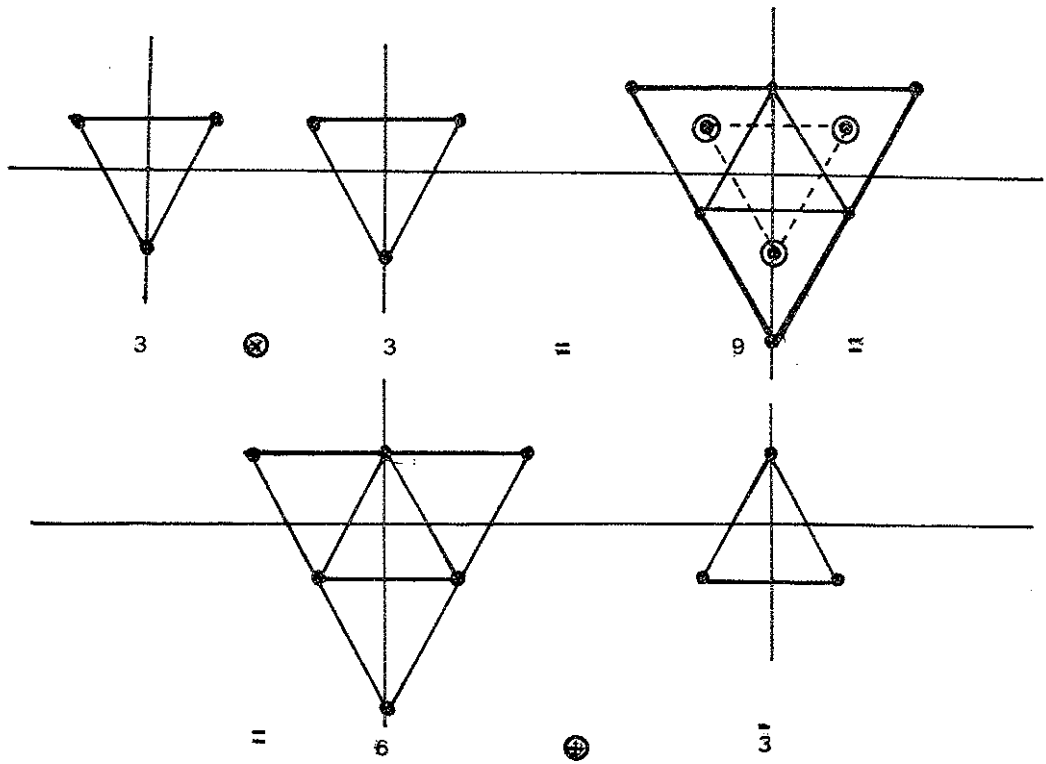


Fig. 66

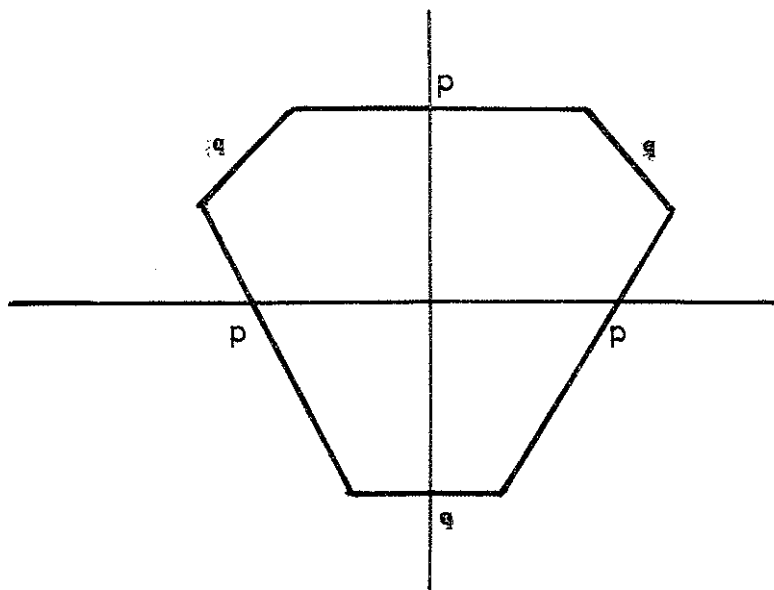


Fig. 67

et \underline{n} , si au lieu de définir la charge électrique conservée par la relation $Q=I_3 + Y/2$, on définit une autre sorte de "charge" $Q' = U_3 + Y/2$, où U est un spin analogue à l'isospin et que l'on appelle, faute de mieux, U-spin. De cette façon le quark \underline{p} qui appartenait à un doublet du spin isotopique (avec le quark \underline{n}), est maintenant un singulet de U-spin, tandis que \underline{n} et λ forment un doublet et \underline{n} est étrange par rapport à $Q' (=3/2)$, les deux autres étant non étranges, avec $Q'=-1/3$.

Pour construire maintenant les mésons il nous faut faire les différentes combinaisons quark-antiquark, ou en langage mathématique effectuer le produit tensoriel des représentations 3 et $\bar{3}$,

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8 \quad (\text{IX.4})$$

Une façon pratique de vérifier cette relation tensorielle consiste à superposer trois fois le triangle des antiquarks à celui des quarks de manière à faire coïncider le centre de gravité de l'antitriangle successivement avec les trois sommets du triangle tout en maintenant le parallélisme des côtés (fig68):

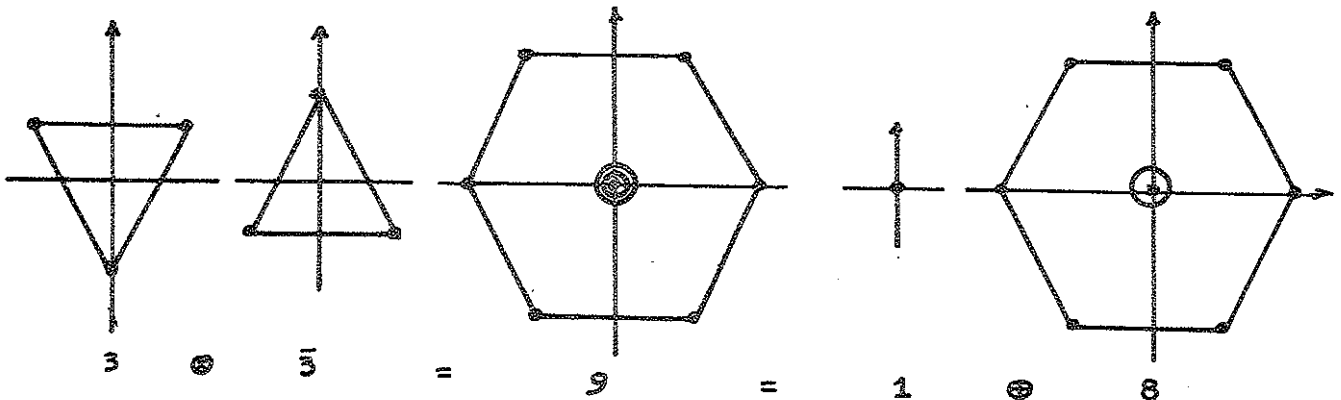


Figure 68

On obtient ainsi 9 combinaisons quark-antiquark (le centre du diagramme est un point triple), c'est-à-dire un nonet de mésons qui se décompose en un singulet et un octet. Effectivement on peut construire deux tels diagrammes, un contenant les mésons de spin 1 (et provenant du spin +1/2 du quark et du spin +1/2 de l'antiquark) et un autre avec les mésons de spin zéro (+1/2 -1/2), ce qui est parfaitement conforme à ce que nous avons vu à propos de la Voie Octuple.

En ce qui concerne les baryons, on doit faire le produit :

$$\begin{aligned}
 3 \otimes 3 \otimes 3 &= (6 \oplus \bar{3}) \otimes 3 = (6 \otimes 3) \oplus (\bar{3} \otimes 3) \\
 &= 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10 \qquad \text{(IX.5)}
 \end{aligned}$$

Car $6 \otimes 3 = 10 \oplus 8$ et $\bar{3} \otimes 3 = 1 \oplus 8$, comme on le voit à l'aide de la même construction que précédemment sur la figure 68 .

On démontre d'ailleurs que plus généralement toute représentation de $SU(3)$ se présente sous la forme de la figure 67, où p et q sont les nombres d'intervalles entre les points représentatifs qui figurent sur les côtés du polygone. On démontre de même que la dimensionnalité N d'une représentation est donnée par la formule :

$$N = (1 + p) \cdot (1 + q) \cdot (1 + (p+q)/2) \qquad \text{(IX.6)}$$

on peut donc les trouver toutes en portant sur un diagramme (Y, I_3) et à 30° de part et d'autre de l'axe I_3 les nombres $0, 1, 2, \dots, p$ et $0, 1, 2, \dots, q$ et en complétant le réseau (fig. 69) :

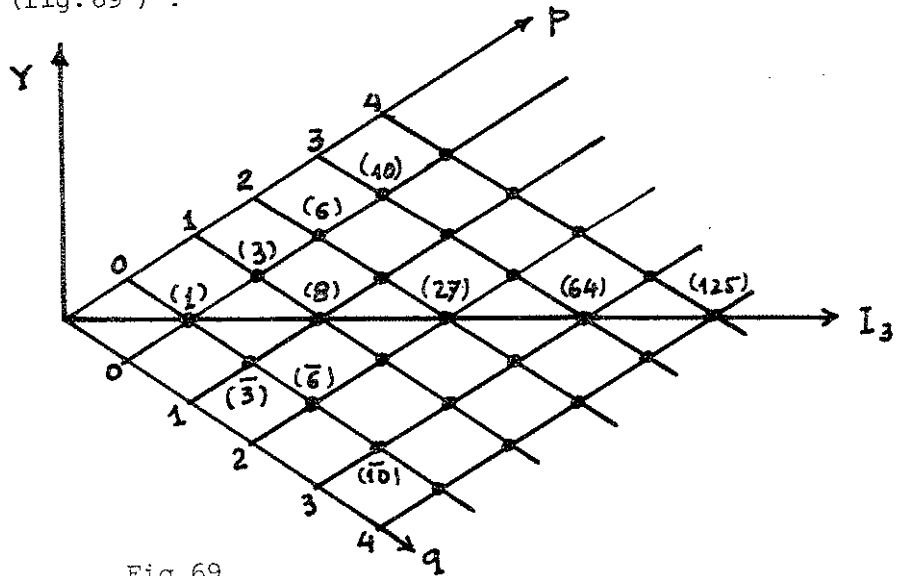


Fig.69

Une représentation se note habituellement $D(p,q)$ et l'on a la correspondance du tableau ci dessous :

TABLE X.

Représentation	$D(0,0)$	$D(1,0)$	$D(0,1)$	$D(2,0)$	$D(0,2)$	$D(1,1)...$
Dimensionnalité	1	3	$\bar{3}$	6	$\bar{6}$	8

qui peut être prolongé à souhait à l'aide de la figure 69 .

Cela rappelé, regardons par exemple le décuplet baryonique $(3/2)^+$; son contenu en quarks est donné par la figure 70 où l'on voit en particulier les différents quarks constituant les membres du décuplet. Parmi les 4 Deltas, le premier de charge $Q = -1$, comporte 3 quarks du type \bar{d} d'étrangeté nulle, le deuxième de charge $Q = 0$ comporte deux quarks \bar{d} et un quark u , le troisième de charge $Q = +1$ comporte un quark \bar{d} et deux quarks u et le quatrième de charge $Q = +2$ comporte trois quarks u . Les quarks \bar{d} et u étant supposés de même masse, on conçoit facilement que les 4 particules Delta auront des masses voisines, car la charge électrique n'influence que très faiblement les masses (ex. proton, neutron). Il n'en est plus de même pour les baryons Sigma, Ksi et Oméga qui contiennent un ou plusieurs quarks s , plus lourds que \bar{d} et u et d'étrangeté -1 . En ce qui concerne le spin $3/2$ des membres du décuplet, il est naturellement obtenu par addition des trois spins $1/2$ des quarks qui pointent tous dans le même sens.

Le modèle rend donc bien compte à la fois des masses, des étrangetés et du spin des particules du décuplet. Quant aux octets, celui de spin $3/2$ s'interprète de la même façon, tandis que pour l'octet $(1/2)^+$ il faut bien que le spin de l'un des trois quarks soit opposé à celui des deux autres.

La situation est tout à fait analogue dans le cas des mésons.

Pour les baryons de spin supérieur à $3/2$ (on en connaît qui ont des spins $5/2, 7/2, \dots$) il est nécessaire de supposer que les quarks gravitent les uns autour des autres, de sorte que le moment angulaire résultant combiné au spin conduit à des spins plus grands que $3/2$.

Pour des informations plus détaillées sur ce modèle on peut consulter les références (424 et 425).

A première vue, la philosophie des quarks semble radicalement opposée à celle du Bootstrap, mais il est possible de concilier l'"aristocratie" des quarks avec la "démocratie" du Bootstrap (419).

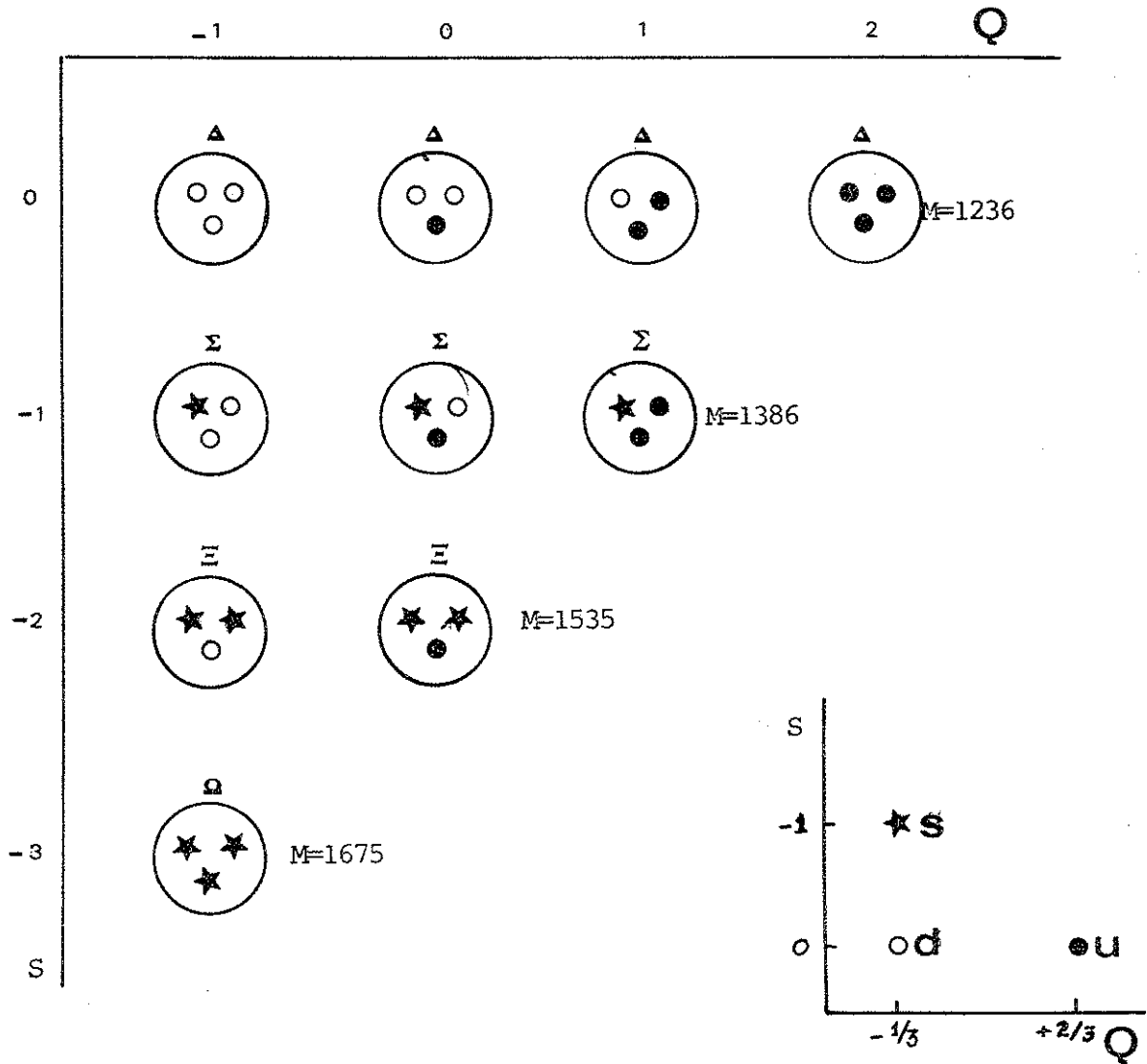


Fig. 71 Les Quarks

Fig. 70 Le contenu en quarks du décuplet baryonique $3/2^+$

En spéculant sur le comportement des quarks, dans le cas où, au lieu d'être des entités purement mathématiques, ils seraient des particules physiques de masse finie, Gell-Mann⁽⁴²²⁾ a considéré la possibilité suivant laquelle la matière ordinaire au voisinage de la surface de la terre pourrait en contenir au moins un, qui serait parfaitement stable, provenant de l'action continue du rayonnement cosmique, mais cependant en quantité très faible, pour avoir échappé à toute détection. Il a aussi insisté de façon réitérée sur l'absence de toute nécessité théorique en faveur de "l'existence de quarks réels, détectables dans le laboratoire". Effectivement les nombreuses recherches entreprises en vue de la détection des quarks se sont soldées par un échec total (à quelques fausses alertes près), y comprise la toute récente expérience au Fermi National Accelerator Laboratory (Batavia) à 200 et 300 GeV^{(426)*}. On suppose alors, pour expliquer ce fait, que les quarks ont des masses très élevées par rapport à celles accessibles aux accélérateurs actuels et par conséquent ils sont retenus à l'intérieur des particules par des forces de liaison absolument énormes en comparaison avec les forces nucléaires. On parle alors d'"emprisonnement" ou de "confinement"^{* *} des quarks, qui serait à l'origine des interactions fortes impliquant la non-observabilité des quarks libres; un sujet sur lequel il nous faudra revenir en temps utile.

Le triplet des quarks à charges fractionnaires n'est pas seulement le plus économique; il a aussi conduit à une meilleure compréhension de la symétrie SU(3), dont il constitue la représentation fondamentale 3, et a connu de remarquable succès pour la classification des particules et ses prévisions importantes pour l'expérience. Mais la charge fractionnaire des quarks et l'échec de toutes les expériences pour leur mise en évidence en tant que particules physiques, ont été considérés comme un inconvénient majeur par beaucoup de théoriciens (à l'exception de Gell-Mann) et d'expérimentateurs. D'où les nombreuses tentatives de construction de modèles à quarks de charge entière qui ont connu un grand développement ces dernières années en relation avec certaines difficultés à propos des théories sur l'unification des interactions faibles et électromagnétiques.

Pour éviter les charges fractionnaires on est obligé d'avoir recours à plus d'un triplet fondamental, c'est-à-dire d'élargir le groupe SU(3) en une symétrie supérieure, ce qui exige l'introduction de nouveaux nombres quantiques supplémentaires. Plusieurs tentatives dans cette voie ont vu le jour dès 1963 et dans deux directions différentes : soit par l'introduction de deux ou trois triplets ⁽⁴²⁷⁾, soit par l'introduction d'un ou plusieurs quartets ⁽⁴²⁸⁾ réalisant la représentation fondamentale 4 du groupe SU(4). La considération de ce groupe nécessite donc l'introduction d'un nouveau nombre quantique qui a connu à travers la littérature des noms différents, supercharge, particularité, charme. Dans cette perspective de SU(4), il a été introduit un quatrième quark, noté p' ou c ou u' (Gell-Mann), ayant la même charge électrique que le quark p et porteur du nouveau nombre quantique, le Charme C = 1, qui est nul pour les autres quarks; ce nouveau quark est un isosingulet (I = 0).

La table donne les nombres quantiques des 4 quarks d'un modèle de Glashow-Iliopoulos-Maiani ⁽⁴²⁹⁾ :

Table XI

Nombre quantiques des quarks (C=charme)

Quarks	Q	Y	C
p'	2/3	- 2/3	1
p	2/3	1/3	0
n	-1/3	1/3	0
λ	-1/3	- 2/3	0

Un autre modèle qui a connu un succès considérable est le modèle des quarks de couleur de Gell-Mann et Fritzsche ⁽⁴³⁰⁾; il s'agit toujours de quarks à charges fractionnaires; mais cette fois-ci il en existerait trois de chaque sorte, différenciés par leur couleur (bleu, vert, rouge)*, soit 9 en tout. Suivant cette optique les particules ordinaires se-

raient des singulets de la couleur, qui est une symétrie parfaitement exacte.

Il n'est pas possible de donner ici une description complète de tous ces modèles, dont il existe un grand nombre; à titre d'exemple les figures 72 reproduisent la classification par $SU(4)$ des bosons et des baryons respectivement. L'addition d'une nouvelle dimension oblige évidemment de sortir du plan pour former des figures dans l'espace à 3 dimensions, qui, à la différence des polyèdres réguliers de Platon, ne sont plus aussi régulières; en effet le nombre des polyèdres réguliers est limité à 5, tandis que le nombre de nos particules est beaucoup plus élevé. Le processus de la marche de la pensée n'en est pas moins frappant pour autant.

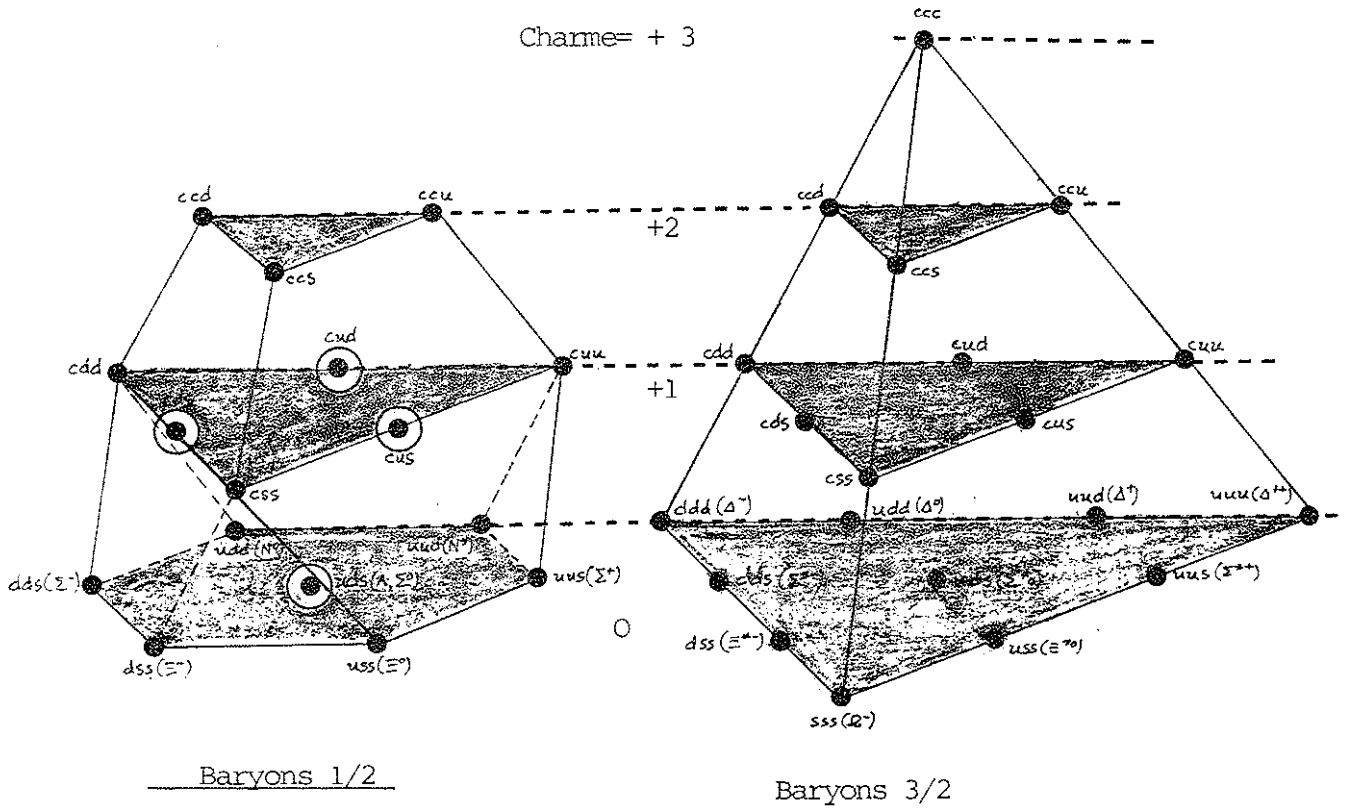
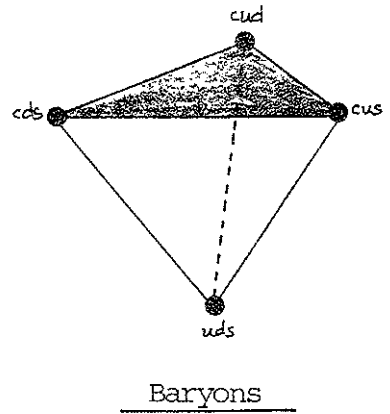
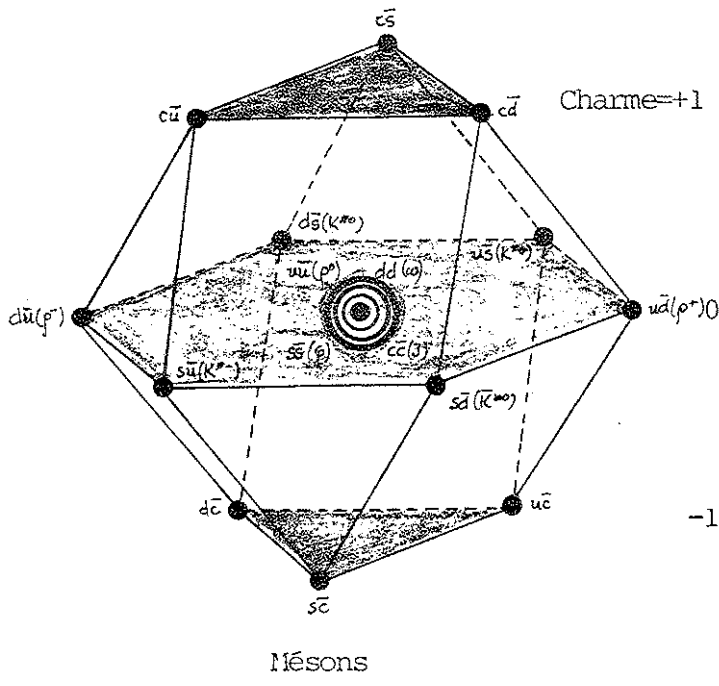


Fig.72 Supermultiplets de SU(4) d'après A.de Rujula et S.Glashow. (Phys.Rev., D12,147,1975 et Scient.Amer.223,N°4,38,1975)

IX-6 - LES TROIS SPECTROSCOPIES ⁽⁴³¹⁾

V. Weisskopf a réuni sous ce titre les trois branches de spectroscopie, optique, nucléaire et corpusculaire, dont la comparaison fait ressortir bien des analogies entre ces trois classes de phénomènes très différents (fig. 73).

L'immense matériel de la spectroscopie optique disponible vers la fin du XIX siècle fut à l'origine de la théorie de la constitution des atomes et de l'organisation du cortège électronique qui a conduit à une bonne compréhension des phénomènes au niveau de l'atome et l'on sait comment Bohr a pu retrouver par voie théorique la constante de Rydberg, qui a joué un si grand rôle dans la détermination des niveaux atomiques et l'explication des processus d'excitation et de désexcitation, dont elle fixait en quelque sorte l'échelle d'énergie. Somme toute, la spectroscopie optique a fini par mettre en évidence une structure de l'atome.

D'une manière analogue, la spectroscopie des noyaux atomiques, commencée par la découverte de Rutherford du noyau lui-même, a conduit, après plusieurs décennies de recherches, à la découverte d'une structure en couches des noyaux, analogue à celle des électrons du cortège. Mais, contrairement à ce qui se passe avec l'atome, dont les niveaux d'énergie sont espacés de quelques électron-volts, l'espacement des niveaux nucléaires est de l'ordre de quelques millions d'électron-volts (MeV), soit trois ordres de grandeur plus grand. De même le passage de l'atome d'un niveau à un autre par émission ou absorption d'un photon s'effectue dans le cas du noyau d'une façon très différente par absorption d'énergie cinétique d'autres particules et par émission de nouvelles particules, les leptons (électrons et neutrinos), prenant naissance au moment même de la désexcitation. Cette structure en niveaux du noyau trahissait donc une organisation des nucléons à son intérieur, tandis qu'à l'époque de Rutherford le noyau était considéré comme ponctuel. On a ainsi pu calculer un rayon nucléaire, tout comme le rayon de l'atome de Bohr, et une constante de Rydberg pour le noyau, qui est de l'ordre de quelques MeV.

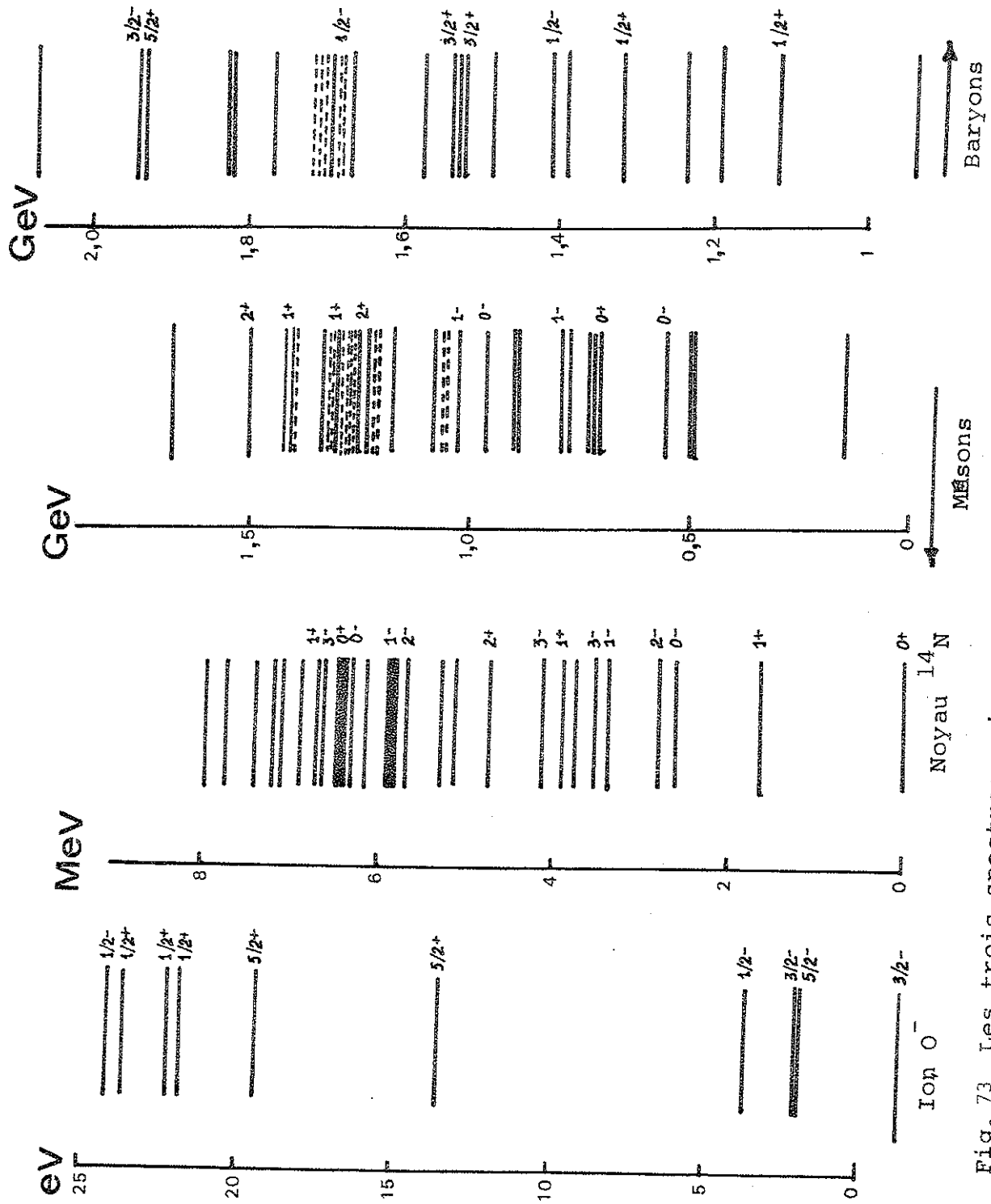


Fig. 73 Les trois spectroscopies ions, noyaux, hadrons neutres.
 (Notez la différence des échelles d'énergie).

On aurait donc pu espérer arriver à des conclusions analogues dans le cas des particules individuelles, mais, malgré certaines analogies de forme, la situation semble bien plus compliquée. Non seulement les niveaux d'énergie du spectre des particules sont espacés d'un ordre de grandeur encore mille fois plus grand que dans le cas du noyau, soit de plusieurs centaines de MeV, mais même les niveaux les plus bas sont habituellement instables et se désintègrent avec émission d'autres particules en nombre variable et dont la nature dépend de la force responsable de cette désintégration. On a certes pu mettre en évidence des multiplets d'isospin $(2I + 1)$, comme les multiplets du moment angulaire $(2J + 1)$, et des formules de masse permettant le calcul de la masse de tous les membres d'un multiplet en connaissant la masse d'un d'entre eux, mais, tout compte fait, nous ne possédons pas une compréhension convenable du spectre des particules, comme nous sommes dans l'ignorance totale de la dynamique à laquelle obéissent les constituants éventuels des particules, quarks, partons ou quelque'autre nom qu'on puisse leur donner. Il n'a donc pas été possible de formuler une théorie satisfaisante et cohérente d'une structure possible dans le domaine subnucléaire, quoique plusieurs indications semblent militer en faveur d'une telle structure.

Nous aurons l'occasion d'y revenir.

IX-7 AUTRES PARTICULES, LES TACHYONS ?

Ne quittons pas le domaine de la pure spéculation théorique sans mentionner une nouvelle classe de particules, sorties de l'imagination des théoriciens, les tachyons, dont le nom, proposé par Feinberg⁽⁴³²⁾, suggère qu'il s'agit d'objets voyageant à des vitesses supérieures à celle de la lumière. On a alors, par opposition, introduit le nom de tardyons⁽⁴³³⁾ ou celui plus heureux de bradyons⁽⁴³⁴⁾ pour les autres particules ordinaires et celui de luxons⁽⁴³⁵⁾ pour les photons et les autres particules qui se propagent à la vitesse de la lumière (neutrinos).

Introduites vers 1960⁽⁴³⁶⁾ ces particules (si l'on peut encore appeler ainsi un objet de masse imaginaire), ont fait couler beaucoup d'encre, à cause de leurs propriétés inhabituelles, des difficultés de leur détection et des nombreuses objections théoriques auxquelles elles ont donné lieu⁽⁴³³⁾ :

La question remonte au début du siècle et avant la formulation de la théorie de la relativité restreinte avec un article de A. Sommerfeld⁽⁴³⁷⁾ qui, considérant le problème de l'accélération des particules à des vitesses supérieures à celle de la lumière, arrivait à la conclusion que de telles particules se comporteraient d'une manière absurde en s'accélégrant par perte d'énergie. Puis Einstein vint ériger un "mur de lumière" qu'aucune particule ne peut franchir, à cause de la fameuse relation de variation relativiste de la masse :

$$m = m_0 [1 - (v/c)^2]^{-\frac{1}{2}}$$

où m_0 est la masse de la particule au repos, v sa vitesse et c la vitesse de la lumière. Ainsi aucune particule ne peut acquérir une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière; quant à la lumière, elle voyage toujours à une vitesse $v = c$ et cela quelle que soit son énergie ce qui n'est possible que si sa masse au repos est nulle. Il en est de même avec le neutrino. Photons et neutrinos sont donc des particules qu'il n'est pas possible d'accélérer, tandis que toutes les autres particules peuvent être accélérées, mais sans jamais atteindre la vitesse de la lumière.

Mais comme Bilaniuk et Sudarshan, l'ont suggéré⁽⁴³⁶⁾, l'accélération n'est pas l'unique processus de production de particules rapides, puisque les photons et les neutrinos produits par les réactions nucléaires vont toujours à la vitesse de la lumière sans avoir subi d'accélération. D'où la question : n'est-il pas possible qu'il existe une troisième classe de particules supra lumineuses ?

La théorie de la relativité interdit l'accélération d'une particule à des vitesses supérieures à c , mais n'est-il pas possible que

de telles particules soient produites par un processus encore inconnu? La réponse à cette question est affirmative pourvu que la masse des tachyons soit imaginaire : $m_0 = i\mu$ (μ réel).

Dans ces conditions l'énergie et l'impulsion des tachyons sont bien réelles mais leur masse imaginaire n'a pas de signification physique, car il n'existe pas d'observateur par rapport auquel un tachyon serait au repos. Théoriquement, il n'y a donc pas de difficultés logiques pour une masse propre, une longueur propre ou une vie moyenne propre imaginaires.

Mais alors une première et sérieuse difficulté se présente: un tachyon à énergie positive peut paraître à un autre observateur comme ayant une énergie négative. Or une particule à énergie négative qui recule dans le temps peut être considérée comme une particule à énergie positive qui avance dans le temps, de sorte que le seul désaccord entre les deux observateurs est quant à la direction de propagation de la particule (principe de réinterprétation).

Bien d'autres objections concernant les tachyons ont été amplement discutées dans la littérature, la plus fondamentale étant la violation de causalité, qui pose des problèmes difficiles pour être exposés ici.⁽⁴³⁸⁾

X. LE NEUTRINO

Dans la première partie de ce travail nous avons abandonné le neutrino dans le statut incertain et inconfortable d'une particule dont l'existence était postulée pour les besoins de la cause; son adoption par Fermi, dans sa formulation de la théorie de la radioactivité, a eu pour résultat que toute spéculation sur la radioactivité β ne pouvait guère se passer du neutrino, même si personne ne voulait avouer ouvertement ne pas croire à son existence, à cause de ses bien étranges propriétés qui laissaient prévoir que sa détection était une tâche formidable.. Dénué de charge électrique et très probablement de masse et de moment magnétique il ne pouvait donner lieu à un phénomène observable (ionisation...)!

Cependant dès 1936, Leipuner⁽⁴³⁹⁾ avait pu mettre en évidence le recul du noyau de ^{11}B provenant de la désintégration du ^{11}C à l'état gazeux, une expérience de grand intérêt historique qui a ouvert la voie à toute une série de tentatives dans le même sens. La mise en défaut de la conservation de l'impulsion a été constaté en 1938 par Crane et Halpern⁽⁴⁴⁰⁾ qui ont réussi à mesurer l'impulsion emportée par le noyau de recul du ^{38}Cl dans une chambre de Wilson qui montrait aussi l'électron émis. Il faut bien se rendre compte des difficultés énormes de ce genre d'expériences; en effet les énergies de recul ne dépassent pas dans le meilleur des cas une centaine d'électron-volts, ce qui peut certes donner un effet observable dans une chambre de Wilson sous pression réduite, mais il en va tout autrement si l'on désire une mesure précise de cette énergie.

La découverte de la radioactivité artificielle a mis à la disposition des physiciens nucléaires un nombre considérable de radionuclides émetteurs d'électrons positifs et négatifs et plusieurs centaines de spectres β ont été étudiés en vue de tester la validité de la théorie de Fermi et ses conséquences; plus particulièrement la forme de la partie supérieure du spectre dépend de la masse du neutrino. Malheureusement la détermination exacte de cette forme n'est pas assez précise pour permettre une bonne détermination de la masse du neutrino, comme on peut se rendre compte par la figure 74 se rapportant à un des cas les plus favorables. La limite supérieure de la masse du neutrino obtenue dans cette expérience⁽⁴⁴¹⁾ est de 250 eV et les mesures les plus récentes⁽⁴⁴²⁾ n'ont pas pu, malgré tous les raffinements imaginables, faire descendre cette valeur au dessous de 60 eV.

Une autre question importante à propos du neutrino était de savoir si cette particule obéit à l'équation de Majorana, auquel cas il n'y a pas lieu de distinguer entre particule (neutrino) et antiparticule (antineutrino), ou bien à l'équation de Dirac, auquel cas la particule est différente de l'antiparticule (trou). Par contre la théorie de la radioactivité β peut se formuler indépendamment de cette question et ne peut donc fournir aucun renseignement à cet égard.

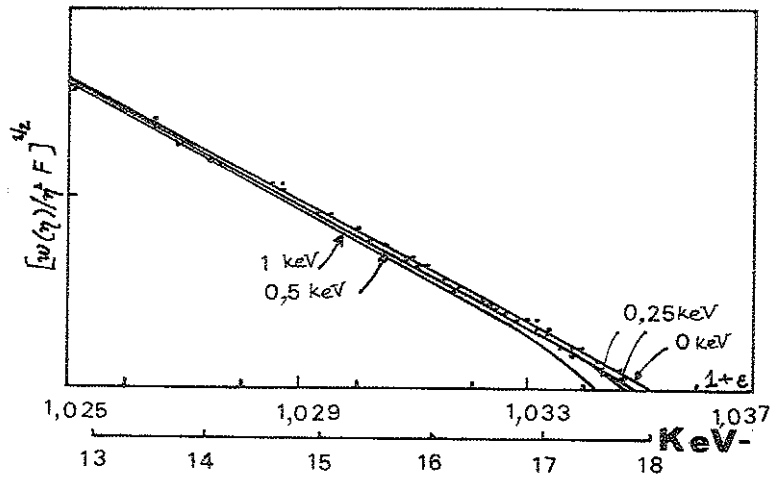


Fig. 74 Forme de la partie supérieure du spectre des électrons du tritium (diagramme de Kurie) comparé avec celle obtenue pour différentes valeurs de la masse du neutrino.

(Phys.Rev., 88, 689, 1952).

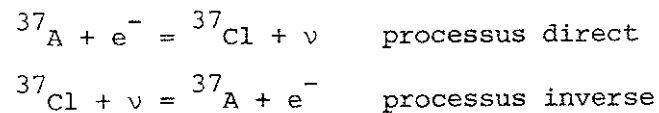
Une méthode capable de faire cette distinction avait été suggérée par Furry⁽⁴⁴³⁾ dès 1937; elle consiste à mesurer la vie moyenne dans la radioactivité β double, que l'on peut représenter par le processus élémentaire :

$$n = p + e^{-} + \nu \quad (X.1)$$

produit deux fois consécutivement.

Le calcul montrait que dans le cas d'une particule de Dirac, il devait y avoir un dégagement d'énergie de $\sim 2\text{MeV}$ avec une vie moyenne supérieure à 10^{20} années. Si par contre il s'agissait d'une particule de Majorana, le neutrino émis pendant le premier stade pourrait être absorbé pendant le second, avec, comme effet net, l'émission de deux électrons uniquement et cela avec une vie moyenne de 10^{12} années⁽⁴⁴⁴⁾. On conçoit aisément les difficultés inhérentes à une telle expérience, mais quelques mesures récentes semblent être en faveur d'un neutrino de Dirac⁽⁴⁴⁵⁾.

C'est finalement Davis⁽⁴⁴⁶⁾ qui s'est posé la question d'une distinction possible neutrino-antineutrino par une méthode radiochimique, proposée dix ans auparavant par Pontecorvo⁽⁴⁴⁷⁾ pour la détection du neutrino par capture de celui-ci par le ^{37}Cl , ce qui conduit à la formation de ^{37}A avec émission d'un électron. L'antineutrino étant par définition la particule qui accompagne l'électron dans la désintégration β^{-} , Davis a posé la question de la façon suivante : Dans les deux processus:



le second ne pourrait pas se produire par les neutrinos venant d'un réacteur nucléaire qui sont effectivement des antineutrinos par définition. Davis entreprit l'étude du processus inverse ci-dessus en irradiant 200 litres de tétrachlorure de carbone au réacteur de Brookhaven qui donnait un flux de $(3-4) \cdot 10^{11}$ antineutrinos par seconde. Après 30-75 jours d'irradiation

l'argon formé, entraîné par un courant d'hélium et après des patientes et difficiles séparations, était admis dans un compteur Geiger-Müller. Les résultats sont rassemblés dans la table XII ci-après :

Table XII

Bruit de fond	Signal	Section efficace
62,5 ± 2,2	64,9 ± 3,3	(0,7 ± 1,3) . 10 ⁻⁴⁵ cm ²
40,9 ± 1,7	46,7 ± 3,0	(0,6 ± 0,4) . 10 ⁻⁴⁵ cm ²
32,9 ± 2,6	33,2 ± 2,2	(0,1 ± 0,6) . 10 ⁻⁴⁵ cm ²

Davis en concluait qu'il n'y avait pas d'argon formé et que la section efficace du processus inverse ci-dessus est inférieure à 0,9.10⁻⁴⁵ cm².

Pour les nombreux autres travaux ayant pour objet le neutrino et sur lesquels il serait trop long de s'étendre ici, on peut consulter l'excellente monographie de Allen⁽⁴⁴⁸⁾. On se contentera donc de reproduire un chiché (fig. 75) qui constitue un exemplaire particulièrement net des expériences de recul.

La détection de l'antineutrino libre : la première tentative de détection directe de l'antineutrino remonte à 1953 (on parlait alors uniquement de neutrino) époque à laquelle Reines et Cowan⁽⁴⁴⁹⁾ ont entrepris de mettre en évidence le processus :



Le détecteur était un cylindre de 75 cm de diamètre et 75cm de longueur rempli d'un scintillateur liquide (riche en hydrogène) placé au voisinage d'un réacteur (Hanford) de Los Alamos et entouré de paraffine et de plomb. 90 photomultiplicateurs regardaient le cylindre pour enregistrer les coïncidences différées entre l'impulsion provenant de l'annihilation du positron et celle provenant de la capture radiative du neutron dans le scintillateur chargé d'un sel de cadmium. Avec un taux de comptage de



Fig. 75 Désintégration d'un noyau d'Hélium 6 en $\text{Li}6$ et électron mettant en évidence le noyau de recul.
(J.Csikay et A.Szalay, Suppl.Nuovo Cimento, 1957)

$0,41 \pm 0,20$ impulsions par minute, les auteurs concluaient prudemment qu'ils avaient le sentiment d'avoir probablement identifié le neutrino libre" (désigné par eux par ν qui est en fait l'antineutrino accompagnant l'électron pendant la radioactivité β).

Une seconde expérience du même genre, mais plus élaborée, a alors été entreprise auprès d'un grand réacteur de Savannah River Plant (10^{17} antineutrinos par cm^2 et par seconde)⁽⁴⁵⁰⁾. Cette fois un signal de $2,88 \pm 0,22$ impulsions/heure a été obtenu pour une durée de 1371 heures de marche.

Cette expérience célèbre est la première à avoir démontré l'existence de l'antineutrino libre* ; elle fut reprise en 1958 avec 14.000 litres de scintillateur liquide, afin de déterminer la section efficace du processus (X,2), dont la valeur expérimentale de $(11,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-44} \text{cm}^2$, est en excellent accord avec la valeur prévue par la théorie du neutrino à deux composantes⁽⁴⁵¹⁾.

La désintégration du neutron ne doit donc pas être représentée par le processus (X,1), mais par :

$$n = p + e^- + \bar{\nu} \quad (\text{X.3})$$

relation qui a servi à la définition de l'antineutrino (accompagnant le e^-) le neutrino étant la particule accompagnant le e^+ de la radioactivité β^+ .

Pendant cette même année 1956, Lee et Yang avaient avancé la possibilité de non-conservation de la parité par les interactions faibles, brillamment confirmée expérimentalement et qui, pour la première fois, rendait possible la discrimination entre la droite et la gauche. Peu de temps après, l'hélicité du neutrino était mesurée⁽⁴⁵²⁾ et trouvée être négative (et par conséquent celle de l'antineutrino est positive), conformément à la théorie à deux composantes, suivant laquelle chacune de ces particules ne possède qu'un seul état de polarisation, avec son spin parallèle (anti-

parallèle) à son impulsion, ce qui définit le sens d'une vis à droite ou à gauche. Par convention le neutrino est gauche et l'antineutrino droit, à l'image d'une toupie qu'un observateur voit s'éloigner de lui étant couchée sur son axe et tournant suivant le sens des aiguilles d'une montre (antineutrino) ou bien en sens inverse (neutrino).

Après la découverte du muon et du pion on représentait habituellement leurs désintégrations par :

$$\pi^{\pm} = \mu^{\pm} + \nu \quad (\text{X.4})$$

$$\mu^{\pm} = e^{\pm} + \nu + \bar{\nu} \quad (\text{X.5})$$

mais une fois reconnue la distinction neutrino-antineutrino, le schéma (X.5) a été remplacé par (X.6) :

$$\mu^{\pm} = e^{\pm} + \nu + \bar{\nu} \quad (\text{X.6})$$

schéma tout à fait analogue à (X.3) à ceci près que dans (X.6) les quatre fermions sont tous des leptons.

En attribuant un nombre leptonique à chaque particule du processus (X.6), comme Konopinski et Mahmoud⁽⁴⁵³⁾ l'ont envisagé (1953), on a, pour des raisons historiques, considéré l'électron négatif comme étant la particule (nombre leptonique +1) et le positron l'antiparticule (nombre leptonique -1). On aurait pu, par analogie, considérer le muon négatif comme particule et le muon positif comme antiparticule, mais d'autres considérations expérimentales ont confirmé cette attribution, comme l'étude de la forme du spectre de l'électron de désintégration du muon positif ainsi que la mesure de l'hélicité du e^+ , qui s'est bien trouvée être +1⁽⁴⁵²⁾. Comme elle doit être la même que celle du muon, c'est donc bien le muon positif qui est l'antiparticule.

Un ou deux neutrinos ? On peut à priori se poser la question de savoir si le neutrino (antineutrino) de la radioactivité β est le même ou bien différent de celui provenant de la désintégration du muon. En effet on peut se demander pourquoi la paire neutrino-antineutrino du

processus (X.6) ne s'annihile pas. Est-ce que ces deux particules ne seraient pas différentes, l'une venant du muon désintégré et l'autre accompagnant l'électron ?

Quelques conséquences d'une telle possibilité avaient été discutées dès 1943 par Sakata⁽⁴⁵⁴⁾ et Oneda et Pati⁽⁴⁵⁵⁾ avaient envisagé l'existence de deux paires de neutrinos, mais c'est finalement Pontecorvo⁽⁴⁵⁶⁾, puis Schwartz⁽⁴⁵⁷⁾ et Lee et Yang⁽⁴⁵⁸⁾ qui ont mis ce problème sur sa vraie voie. Suivons le raisonnement de Pontecorvo qui est particulièrement clair : Comme il n'existait aucun argument théorique ou expérimental en faveur de l'identité de ces deux particules, Pontecorvo introduisit une notation différente pour chacun d'eux en appelant ν_e et ν_μ respectivement le neutrino de la radioactivité β et celui de la désintégration du muon. A première vue une telle distinction pourrait sembler être une complication superflue, mais il existe des arguments rendant cette hypothèse séduisante. En effet si l'on considère que le muon n'est en fin de compte qu'un électron lourd, les processus :

$$\mu^\pm = e^\pm + \gamma \quad (X.7)$$

$$\mu^\pm = e^\pm + e^+ + e^- \quad (X.8)$$

$$\mu^- + p = e^- + p \quad (X.9)$$

devraient être permis; or leurs limites expérimentales sont de l'ordre de $2,0 \cdot 10^{-8}$, $6,2 \cdot 10^{-9}$ et $2,0 \cdot 10^{-7}$ respectivement. Il doit donc y avoir une règle de sélection (nombre quantique différent pour l'électron et le neutrino) qui interdit ces processus, une hypothèse envisagée indépendamment par Schwinger⁽⁴⁵⁹⁾ et Nishijima⁽⁴⁶⁰⁾ qui distinguaient deux sortes de charge leptonique, donc deux nombres leptoniques (électronique et muonique), séparément conservés, contrairement à la lourdeur (heavyness) de Konopinski et Mahmoud, ou la conservation des leptons de Schwinger.

Pontecorvo fait encore remarquer que même avec l'introduction du boson intermédiaire⁽⁴⁶¹⁾ et de la non-localité du processus de désintégration du muon qui rend possible le processus (X.7), ce processus est absolument interdit si ν_e et ν_μ sont différents. Si ce point de vue est

correct on doit donc écrire:

$$\begin{array}{ll}
 p = n + e^+ + \bar{\nu}_e & \text{pour la radioactivité } \beta^+ \\
 n = p + e^- + \bar{\nu}_e & \text{" " } \beta^- \\
 \pi^+ = \mu^+ + \bar{\nu}_\mu & \text{" désintégration du } \pi^+ \\
 \pi^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu & \text{" " du } \pi^- \\
 \mu^+ = e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu & \text{" " } \mu^+ \\
 \mu^- = e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu & \text{" " } \mu^- \\
 \bar{\nu}_e + p = n + e^+ & \text{" la réaction de Reines-Cowan}
 \end{array}$$

Par contre les processus :

$$\begin{array}{l}
 \bar{\nu}_e + e^- = \bar{\nu}_\mu + \mu^- \\
 \bar{\nu}_e + p = n + \mu^+ \\
 \bar{\nu}_\mu + p = n + e^+ \\
 \bar{\nu}_\mu + e^- = \bar{\nu}_e + e^-
 \end{array}$$

seraient interdits.

Il en résulte que dans une interaction neutrino-nucléon les seuls processus possibles sont :

$$\begin{array}{ll}
 \bar{\nu}_\mu + p = n + \mu^+ & \bar{\nu}_e + p = n + e^+ \\
 \nu_\mu + n = p + \mu^- & \nu_e + n = p + e^-
 \end{array} \quad (X.10)$$

c'est-à-dire que les neutrinos muoniques ne peuvent produire que des muons (positifs ou négatifs), mais jamais des électrons, par contre les neutrinos de radioactivité ne peuvent produire des muons, mais uniquement des électrons (positifs ou négatifs). De plus la première de ces réactions a un seuil de ~ 105 MeV et par conséquent elle ne pourrait pas être observée avec des neutrinos d'énergie inférieure à cette valeur; elle ne peut donc pas avoir lieu en particulier avec les neutrinos émis par un réacteur nucléaire dont l'énergie est inférieure à 10 MeV. Par contre avec les accélérateurs encore en projet* (Brookhaven et CERN) il serait possible de construire des faisceaux purs de neutrinos muoniques énergiques (provenant de la désintégration des pions) et observer cette réaction. Une grande difficulté subsistait : la faible section efficace des neutrinos avec les nucléons. En effet même pour une énergie de quelques MeV un seul neutrino sur 10^{10}

a une chance d'interagir en traversant la terre de part en part.

Une autre question importante pourrait trouver une réponse si le point de vue de Pontecorvo était correct : l'universalité mu-électron. Elle implique en effet que le rapport :

$$R = \frac{\sigma(\nu n \rightarrow p\mu^-)}{\sigma(\nu n \rightarrow p e^-)} = 1,00 \quad (X.11)$$

(si l'on néglige la masse du muon).

Enfin, troisième question, et non la moindre, c'était l'étude de l'interaction faible elle-même, qui d'après la théorie de Fermi conduisait à une violation de l'unitarité, car la section efficace devrait croître linéairement avec l'énergie du neutrino, ce qui signifie en clair qu'au delà d'une certaine énergie (~ 300 GeV) il y aurait plus de réactions que de particules disponibles pour les provoquer.

Il devrait donc y avoir une raison qui fait que la limite de l'unitarité ne peut être dépassée, en freinant de quelque façon la vitesse de la réaction; est-ce l'intervention du fameux boson intermédiaire, ou bien autre chose ?

Tels sont grosso modo les différentes raisons pour lesquelles les expériences avec les neutrinos de grande énergie ont connu un grand essor à partir de 1960, date à laquelle les grands accélérateurs de Brookhaven et du CERN sont entrés en opération.

La découverte du neutrino muonique : la première expérience neutrino fut réalisée en 1961/62 à Brookhaven; elle a été abondamment décrite dans la littérature⁽⁴⁶²⁾ et repose sur le raisonnement suivant : "L'AGS de Brookhaven produit un grand nombre de pions de haute énergie. Les neutrinos provenant de la désintégration des pions seraient nés avec des muons; ils seraient donc du type muonique, s'il y en avait réellement deux sortes. Seulement un nombre négligeable de neutrinos électroniques serait produit (provenant de la désintégration des kaons). Les neutrinos entreraient alors en collision avec les neutrons (et les protons) avec deux

conséquences possibles : Si les neutrinos étaient d'un seul type, ils entreraient en interaction avec les neutrons pour produire des nombres égaux d'électrons et de muons négatifs; s'il y avait deux sortes de neutrinos, l'espèce générée dans cette expérience serait incapable de produire des électrons et l'on devrait observer uniquement des muons ⁽⁴⁶³⁾. Le choix du dispositif et l'énergie de la machine ont été dictés par des considérations pratiques de blindage et de longueur de désintégration des pions. Un nouveau type de détecteur (chambre à étincelles à 90 plaques d'aluminium de 2,5 cm d'épaisseur et 1m^2 de surface, arrangées en 10 modules plongés dans du néon, soit au total 10 tonnes) a été adopté et malgré les nombreuses précautions il y avait encore 80 déclenchements par seconde dus au rayonnement cosmique. Pour se protéger de ce fond important, la durée de l'impulsion de l'AGS fut limitée à $3 \cdot 10^{-6}$ s, avec un taux de répétition tous les 1,2s.

De Septembre 1961 à Juin 1962 et pendant 25 jours de marche, 10^{14} neutrinos ont traversé la chambre en produisant 51 événements (au lieu de 25 attendus), dont 29 avec un seul muon ayant son origine dans la chambre et 22 autres avec un muon accompagné d'une ou plusieurs traces. Mais "there was nothing approximating equal production of muons and electrons". La conclusion était donc claire : "Il y a deux sortes de neutrinos. Ceux produits par la désintégration des pions dans notre expérience sont du type muonique et ne peuvent pas produire des électrons par interaction avec les neutrons. Pour produire des électrons dans cette réaction il faudrait des neutrinos du type électronique" ⁽⁴⁶³⁾.

Une série d'expériences, plus gigantesques encore, a été entreprise au CERN depuis 1963; elles ont fourni un nombre plus important d'événements, avec un flux de neutrinos à faible contamination et comme détecteurs des chambres à étincelles de 8,3 tonnes et la chambre à bulles à liquide lourd (CF_3Br) de 500 litres. Une cible de cuivre était placée devant le goulot d'entrée d'une corne magnétique qui servait à focaliser les particules et à obtenir un flux élevé de neutrinos ou d'antineutrinos au bout d'un écran de 25m de fer ⁽⁴⁶⁴⁾.

La figure 76 reproduit un certain nombre d'événements observés de la sorte. Le cliché (a) représente la diffusion élastique d'un antineutrino muonique donnant un muon positif; (b) est certainement dû à un neutrino produisant un muon négatif; (c) montre la production d'un muon positif et d'un hyperon lambda; par contre (d) est certainement dû à un neutrino du type électronique.

Une fois la distinction entre les deux neutrinos établie, il a été nécessaire d'introduire deux nombres leptoniques différents, L_μ pour le muon et son neutrino et L_e pour l'électron et son neutrino, séparément conservés et ayant les valeurs :

$$\begin{aligned} L_\mu &= +1 && \text{pour le } \mu^- \text{ et le } \nu_\mu \\ L_\mu &= -1 && \text{" } \mu^+ \text{ " " } \bar{\nu}_\mu \\ L_e &= +1 && \text{" } e^- \text{ et } \nu_e \\ L_e &= -1 && \text{" } e^+ \text{ " } \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

Une règle globale (additive ou multiplicative) de conservation du nombre leptonique total $\Sigma(L_\mu + L_e) = \text{constante}$, n'est en contradiction avec aucune expérience .

Quant à la masse du ν_μ elle est moins bien connue que celle du ν_e . Sa détermination la plus récente⁽⁴⁶⁵⁾ montre qu'elle est inférieure à 0,6 MeV et compatible avec zéro, comme celle du ν_e^{**} .

Avant de discuter quelques autres résultats des expériences avec les neutrinos il faudrait mentionner, pour cette première période, les travaux gigantesques sur les neutrinos solaires de R. Davis⁽⁴⁶⁶⁾ et ses collaborateurs. La dernière version de cette expérience remarquable utilise comme détecteur quelques 500 m³ de tétrachloréthylène placés à une profondeur de 1490 m dans la mine Hostake Gold (et cela pour regarder le soleil). Il s'agissait de détecter la réaction de capture :



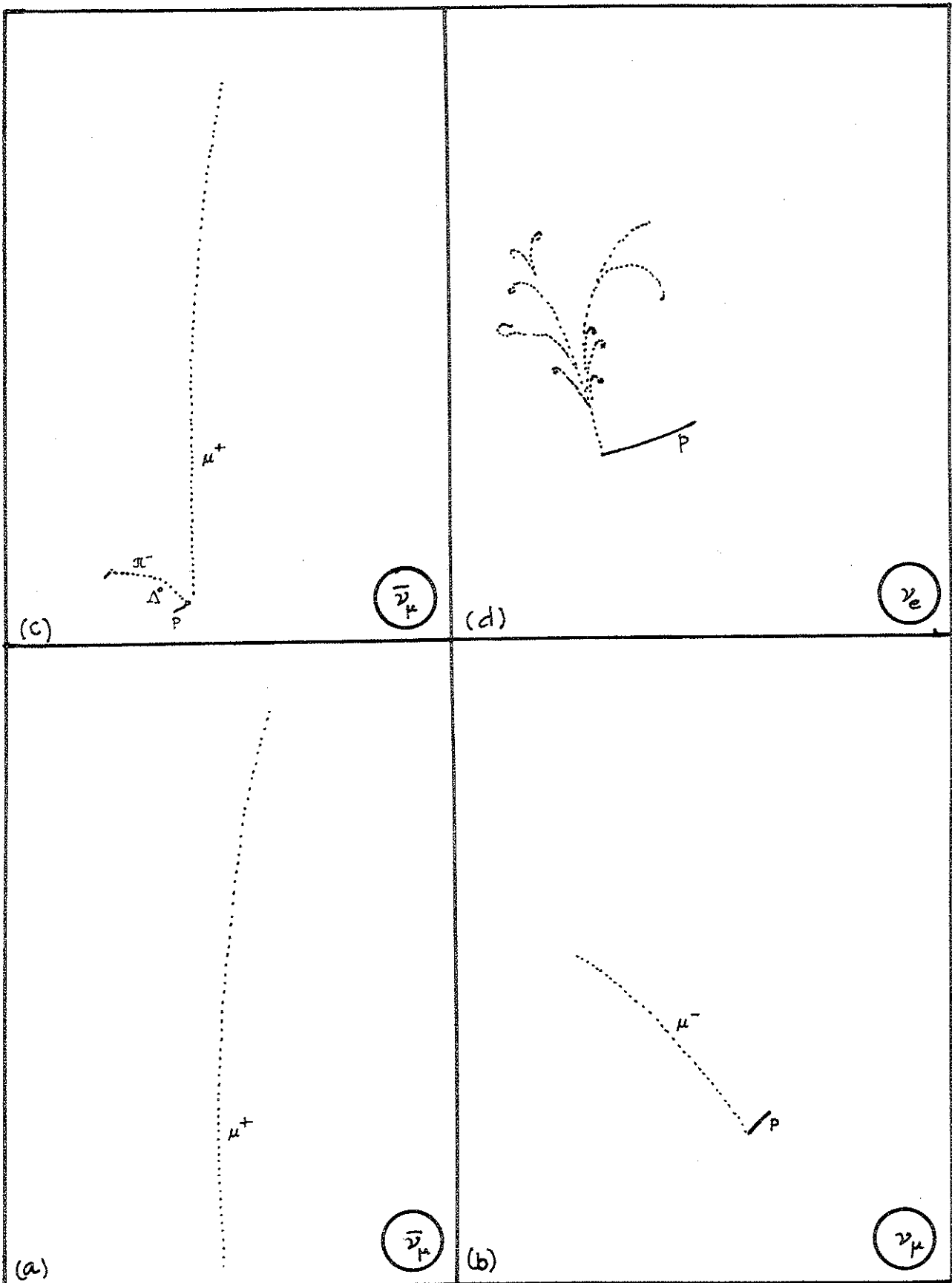


Fig. 76 Divers types d'événements neutrino et antineutrino.

Sans insister sur les nombreux détails expérimentaux importants, disons que ni cette expérience, ni aucune autre n'a permis de détecter avec certitude les neutrinos provenant du soleil (on espérait la production d'un atome d'argon tous les trois jours !). Le résultat s'exprime par $(1,5 \pm 1,0)$ UNS, une unité de neutrino solaire correspondant à 10^{-36} captures par seconde et par atome de chlore.

Cependant le problème des neutrinos solaires est très important, comme est important leur rôle dans les théories d'évolution des étoiles, car environ 1/4 de l'énergie de l'univers est emportée par les neutrinos^{*}. On conçoit que, si tel est le cas, il n'est plus possible de concevoir l'existence d'un système isolé du point de vue thermodynamique (fuite de neutrinos)⁽⁴⁶⁷⁾.

X - 1 QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS.

La détection au laboratoire du neutrino (antineutrino) libre, puis la découverte des deux neutrinos (électronique et muonique), marque une étape dans le développement de la physique des neutrinos et de l'interaction faible à laquelle ils obéissent d'une façon exclusive. L'étape suivante fut une expansion prodigieuse de cette physique, auparavant bloquée par les difficultés considérables dues à la très faible section efficace de l'interaction des neutrinos avec la matière. Pour ce faire il a fallu déployer des efforts d'une grande ampleur et cela dans deux directions différentes : d'une part la construction de faisceaux intenses de neutrinos, par l'amélioration des performances de la nouvelle génération d'accélérateurs (30 GeV à Brookhaven, 28 GeV au CERN, 70 GeV à Serpukhov, 400 GeV à Batavia) en poussant au maximum le nombre des protons circulant dans les machines, en extrayant le plus rapidement possible le faisceau des protons, en construisant des faisceaux très soignés de neutrinos comportant le moins possible de particules de contamination, etc; d'autre part des efforts non moins considérables ont été consacrés à la construction de détecteurs massifs, telle, par exemple, la chambre à bulles à liquide lourd (fréon ou propane), afin d'augmenter le nombre d'interactions (cette chambre qui a

recu le nom évocateur de GARGAMELLE a un diamètre de 2m sur une longueur de 5m et contient 12 tonnes de liquide totalisant ainsi un poids de 1000 tonnes; elle enregistre actuellement une interaction neutrino toutes les 8 photographies). Bien d'autres détecteurs aux dimensions monstrueuses ont été aussi réalisés (chambres à étincelles, calorimètres à absorption totale, spectromètres, etc).

Les neutrinos (antineutrinos) sont produits à l'aide des protons de la machine qui, tombant sur une cible, donnent naissance à des pions et des kaons qui à leur tour se désintègrent pour donner des neutrinos (antineutrinos) dans une large bande d'énergie (1 - 10 GeV au CERN, jusqu'à 200 GeV à Batavia). Il est aussi possible d'obtenir des faisceaux à bande étroite (autour de 40 et 150 GeV à Batavia).

Un grand nombre d'expériences avec les neutrinos et les antineutrinos est en cours depuis une dizaine d'années déjà et un certain nombre de résultats sont obtenus, avec un nombre encore restreint d'événements. Nous nous contenterons donc de signaler un certain nombre de résultats qui sans être parfaitement définitifs, ont peu de chance de se trouver profondément modifiés par la suite, quoique des surprises peuvent toujours survenir.

X-1a SECTIONS EFFICACES TOTALES.

Les sections efficaces totales ont été mesurées pour les processus inclusifs :

$$\nu_{\mu} + N = \ell^{-} + \text{n'importe quoi} \quad (\text{X.13})$$

$$\bar{\nu}_{\mu} + N = \ell^{+} + \text{n'importe quoi} \quad (\text{X.14})$$

consistant à mesurer uniquement le lepton ℓ^{\pm} produit par l'interaction d'un neutrino ou d'un antineutrino (électronique ou muonique) et d'un nucléon N (proton ou neutron).

Ces mesures effectuées principalement au CERN (pour les énergies des neutrinos allant jusqu'à 10 GeV) et au Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) de Batavia jusqu'à 200 GeV, sont résumées sur les figures 77,78, pour les neutrinos et antineutrinos muoniques; elles peuvent être ajustées par des formules linéaires* :

$$\sigma(\nu) = (0,83 \pm 0,11) \cdot 10^{-38} E_{\nu} \text{ cm}^2 \quad (\text{X.15})$$

$$\sigma(\bar{\nu}) = (0,28 \pm 0,05) \cdot 10^{-38} E_{\bar{\nu}} \text{ cm}^2 \quad (\text{X.16})$$

où E est l'énergie en GeV des neutrinos et des antineutrinos.

Ces sections efficaces varient donc linéairement avec l'énergie (pente constante) conformément aux prévisions théoriques (théorie V-A des interactions faibles) et à la prophétie de l'invariance d'échelle de Bjorken⁽⁴⁶⁸⁾ suggérée par les expériences sur la diffusion électron-proton, dont il sera question dans le chapitre suivant.

Des résultats voisins ont été obtenus au CERN⁽⁴⁶⁹⁾ avec les neutrinos et antineutrinos électroniques.

Il y a donc un rapport constant entre les sections efficaces particule-antiparticule :

$$R = \frac{\sigma(\bar{\nu})}{\sigma(\nu)} = 0,34 \pm 0,02 \quad (\text{X.17})$$

Or, une telle augmentation linéaire de la section efficace avec l'énergie, comme nous l'avons vu, violerait l'unitarité au delà de $\sim 300-350$ GeV. Certaines théories (boson intermédiaire, théories de jauge) font intervenir, pour freiner cette croissance explosive, une interaction non-locale, à l'aide d'un boson intermédiaire (W^0 ou Z^0) dont la masse serait de l'ordre de 37-100 GeV mais les énergies actuellement disponibles sont encore loin de cette limite (~ 10 GeV). **

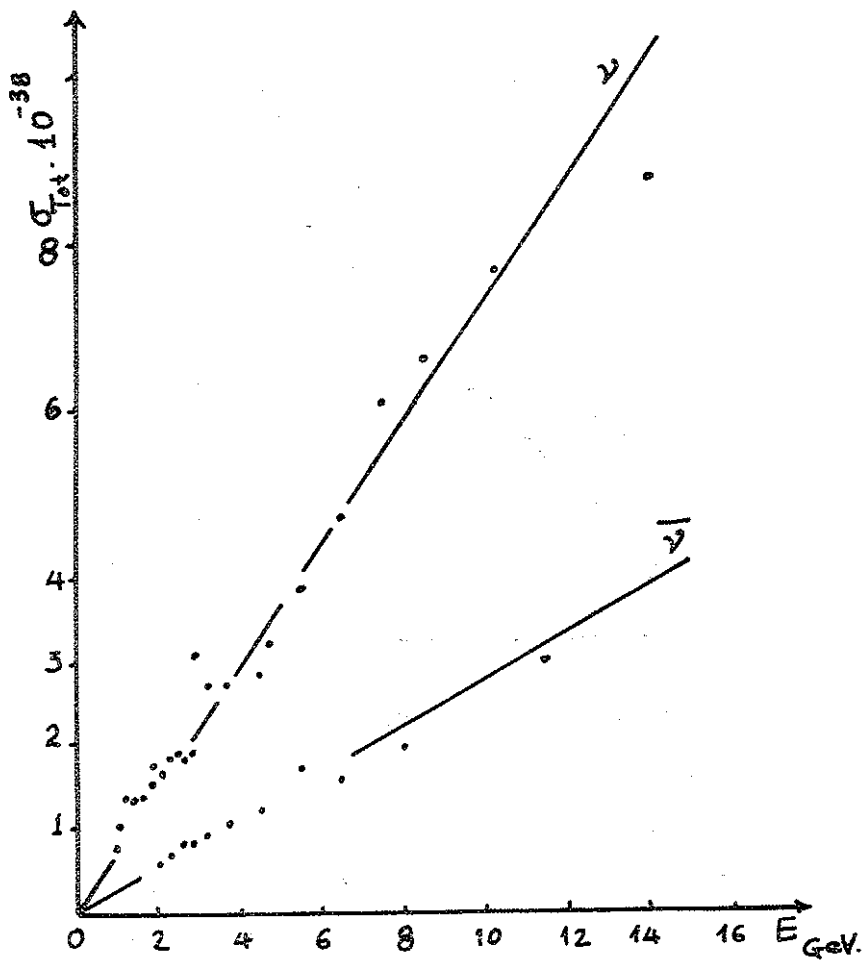


Figure 77

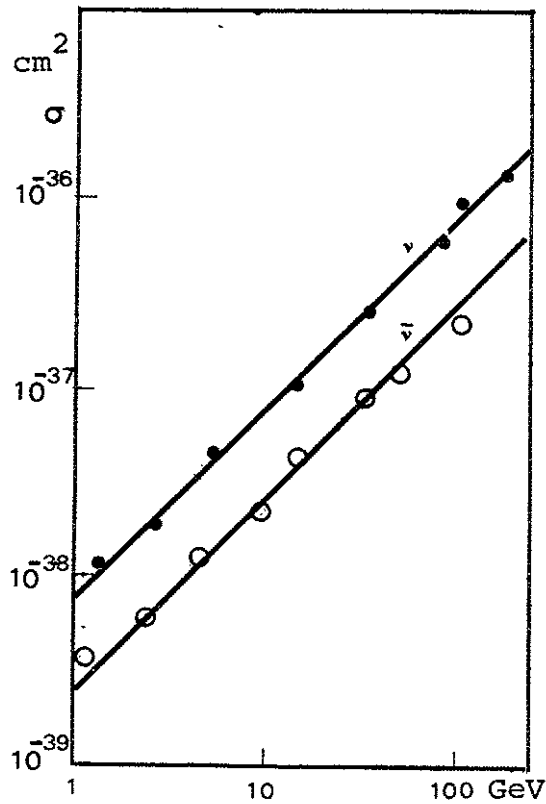


Fig. 78 Sections efficaces totales neutrino et antineutrino-nucléon en fonction de l'énergie.

La théorie prévoit un comportement linéaire si l'interaction a lieu avec des constituants ponctuels du nucléon (quarks ou partons). Le rapport 3 entre ces sections efficaces suggère un spin 1/2 pour ces constituants.

Un autre résultat remarquable dans le domaine des énergies actuelles, est que le muon, dans les processus (X.13 et X.14) emporte une bonne partie de l'énergie disponible (54 ± 5 et $72 \pm 6\%$ respectivement).

Deux autres rapports importants ont été mesurés :

$$R_1 = \frac{\sigma(\nu_e)}{\sigma(\nu_\mu)} = 1,26 \pm 0,23 \quad (\text{X.18})$$

$$R_2 = \frac{\sigma(\bar{\nu}_e)}{\sigma(\bar{\nu}_\mu)} = 1,32 \pm 0,32 \quad (\text{X.19})$$

ils doivent être égaux à l'unité tous deux dans le cas de l'hypothèse de l'universalité muon-électron (p. 311) et de la conservation du nombre leptonique additif. Il n'y a pas désaccord.

X-1b SECTIONS EFFICACES DIFFERENTIELLES.

Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre suivant, car il est en relation étroite avec la diffusion profondément inélastique des électrons sur le nucléon.

X-1c LA DECOUVERTE DES COURANTS NEUTRES.

Dans leur reformulation de la théorie des interactions faibles, Feynman et Gell-Mann⁽⁴⁶¹⁾ avaient délibérément ignoré les courants neutres (leptoniques et baryoniques du type (e^+e^-) , (μ^+e^-) , $(\bar{n} - n)$, etc) pour l'existence desquels il n'y avait à cette époque aucune indication expérimentale. Ce sont Lee et Yang⁽⁴⁵⁸⁾ qui ont envisagé pour la première fois des courants du type neutre à propos des processus :

$$\nu + p = \nu + p$$

$$\nu + n = \nu + n$$

On dit qu'il s'agit dans ces cas de courants neutres du fait que les particules qui y participent ne voient pas leur charge électrique modifiée

avant et après réaction. Ainsi, le courant électromagnétique est un courant neutre, car dans :

$$e^- + e^- = e^- + e^-$$

que l'on représente par le diagramme de Feynman (fig.79) :

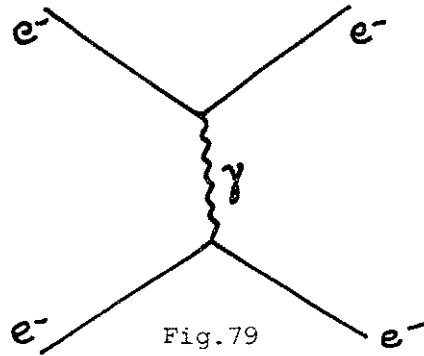


Fig.79

l'interaction électromagnétique résulte de l'échange d'un photon de charge nulle entre les deux courants transportés par chacun des électrons. Par contre les processus (fig. 80 a,b,c) :

$$e^- + p = \nu_e + n$$

$$\nu_\mu + n = \mu^- + p$$

$$\bar{\nu}_\mu + p = \mu^+ + n$$

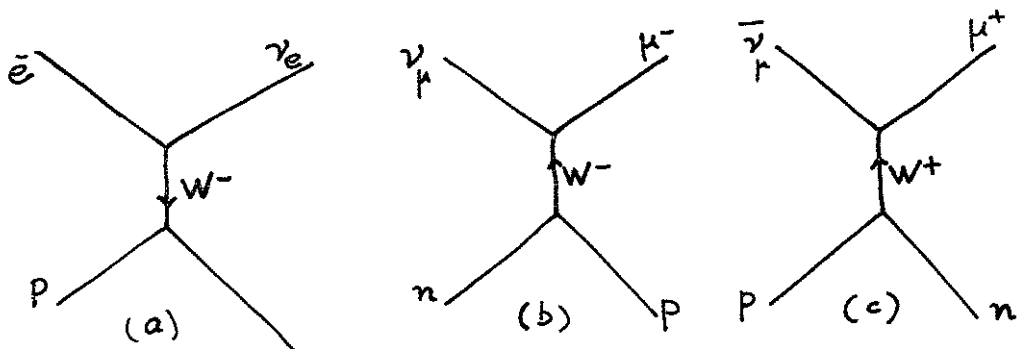


Figure 80

sont des processus à courants chargés, car les particules n'ont pas la même charge électrique avant et après l'interaction qui a lieu par échange

d'une particule chargée. En particulier, pour le cas de la figure 80 b,c le neutrino (antineutrino) se transforme en muon chargé (courant leptonique chargé) et le nucléon voit aussi sa charge électrique modifiée (courant baryonique chargé). Il y aurait un courant leptonique neutre, s'il était possible de mettre en évidence expérimentalement un processus du type :

$$\bar{\nu}_{\mu} + e^{-} = \bar{\nu}_{\mu} + e^{-} \quad (\text{X.20})$$

ou plus généralement un processus dans lequel, après interaction, le neutrino se retrouve à l'état neutrino, sans se transformer en muon (processus sans muon). La réaction doit avoir lieu par échange d'une particule neutre (W^0 ou Z^0) (fig. 81).

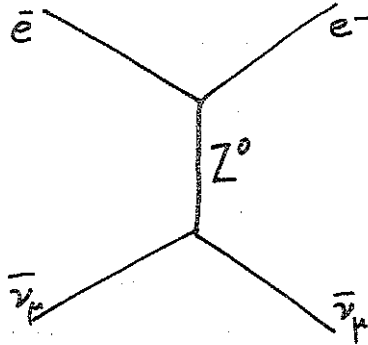


Fig. 81. Si les courants neutres existent, la particule échangée doit être un boson neutre Z^0 .

Ce fut la grande surprise des physiciens du CERN, quand au début de l'année 1973 au cours du dépouillement d'un lot de plus de 700.000 photographies, prises avec Gargamelle dans un faisceau de neutrinos et un faisceau d'antineutrinos, un événement du type courant neutre fut découvert (fig. 82a), suivi d'un deuxième (fig. 82b), tous deux dans les clichés antineutrinos⁽⁴⁷⁰⁾. Après de nombreuses discussions et vérifications, ces deux événements furent interprétés comme étant dûs aux courants leptoniques neutres. Ils furent aussitôt confirmés par plusieurs autres laboratoires (Argonne, Brookhaven, Batavia) par des techniques différentes et finalement homologués par la Conférence de Londres (Juillet 1974), dont les comptes

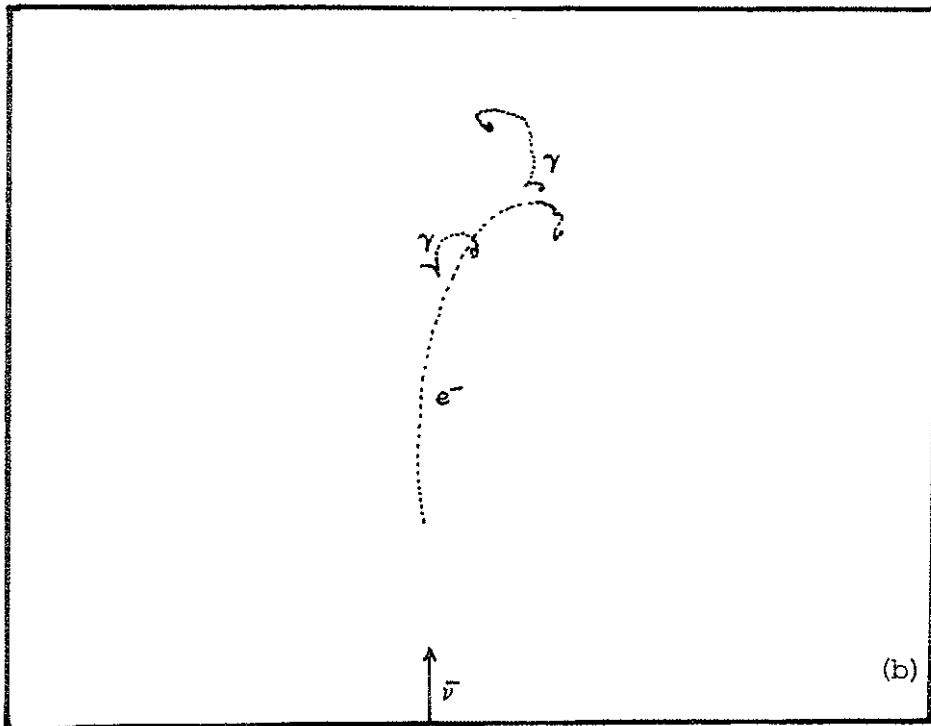
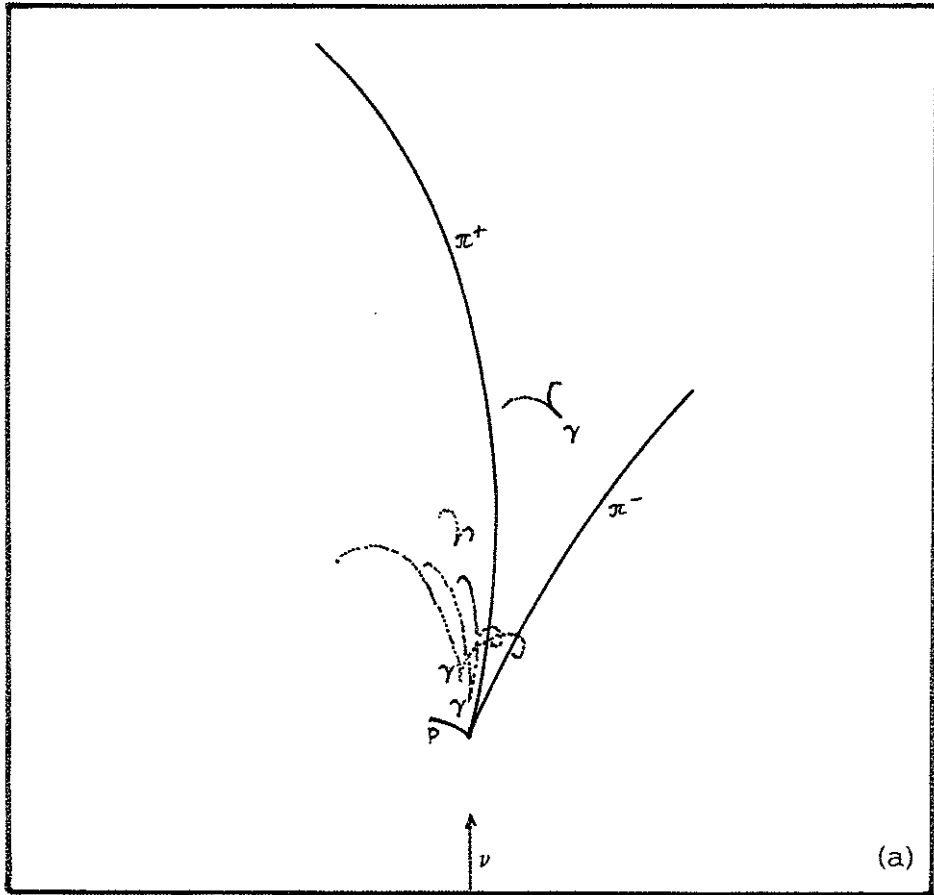


Fig.82 Deux événements à courant neutre.

rendus contiennent de nombreux détails sur ce sujet qui constitue la découverte la plus importante de ces dernières années.

Fait étonnant, ces courants neutres, qui semblaient absents dans la nature, constituent une partie importante des courants responsables de l'interaction faible, puisque le rapport courant neutre (CN) sur courant chargé (CC) est de :

$$\begin{aligned}(\text{CN})/(\text{CC}) &= \sim 0,20 \text{ dans les interactions neutrino et} \\ &= \sim 0,45 \text{ dans les interactions antineutrino.}\end{aligned}$$

Une autre conséquence, et non la moindre, de l'existence des courants neutres, est qu'elle a permis un choix entre différentes théories, dont les unes excluaient leur existence et les autres, celle de Salam-Ward-Weinberg⁽⁴⁷¹⁾, par exemple, nécessitaient de tels courants.

XI - PHENOMENES DE DIFFUSION INELASTIQUE.

Parallèlement à la physique des neutrinos et, grâce aux accélérateurs à électrons (synchrotrons, accélérateurs linéaires, anneaux de collision), la physique des électrons et des photons (produits par rayonnement de freinage ou par annihilation e^+e^-), se développe rapidement pendant ces dernières années.

La validité de l'Electrodynamique Quantique est testée pour des distances de plus en plus courtes; l'électro et photoproduction de particules, les facteurs de forme des nucléons et des noyaux, font l'objet d'un grand nombre de recherches dans plusieurs laboratoires, comme en témoignent les volumineux comptes rendus des nombreux colloques, symposia et conférences interantionales ou nationales qui se tiennent chaque année.

Un photon de grande énergie peut produire dans une chambre à bulles non seulement des pions, mais aussi des particules étranges, des résonances bosoniques ou baryoniques, etc, comme on le voit sur la figure 83 où l'on aperçoit au moins quatre niveaux d'excitation du proton. De même la diffusion

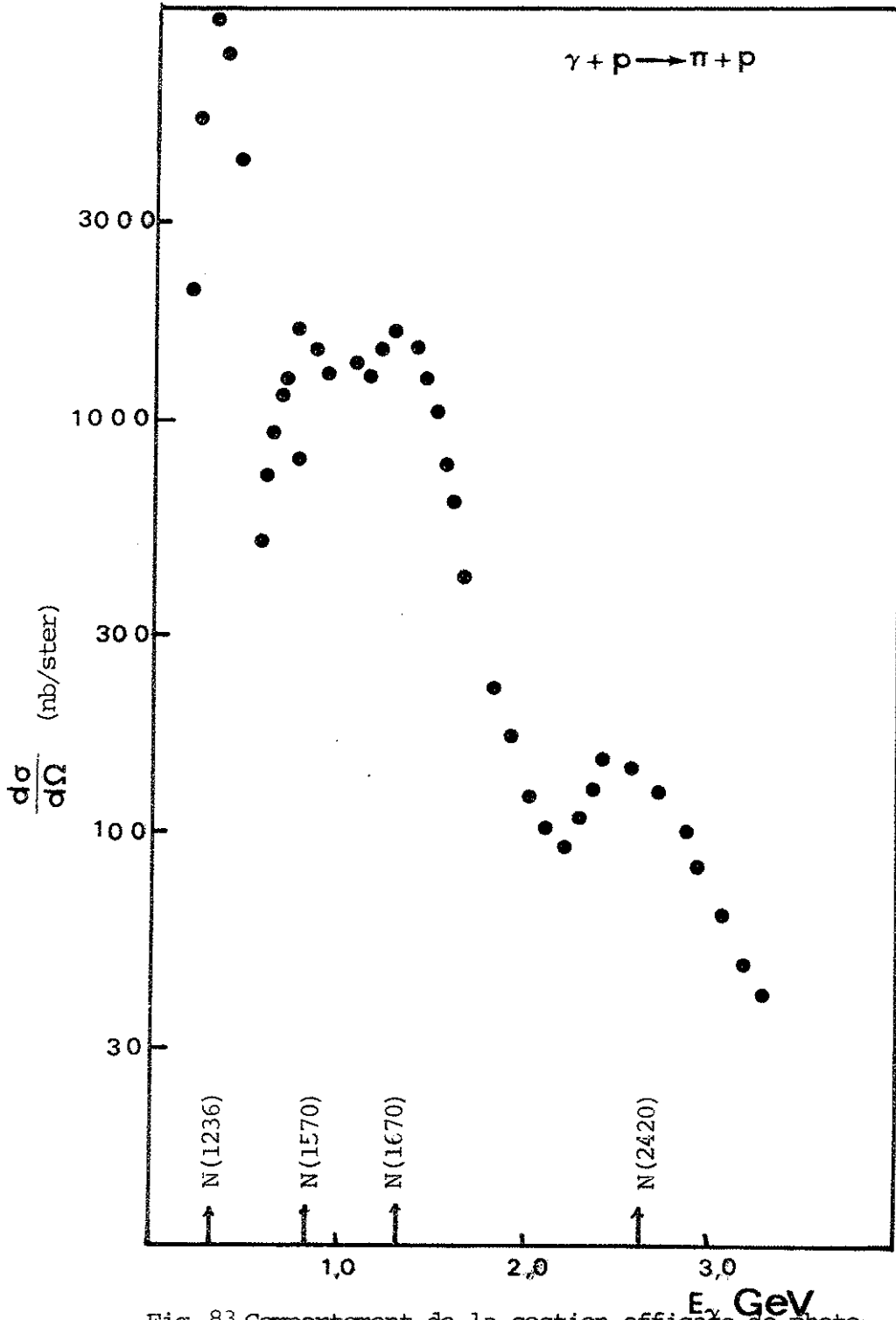


Fig. 83 Comportement de la section efficace de photo-production d'un pion neutre avec l'énergie.

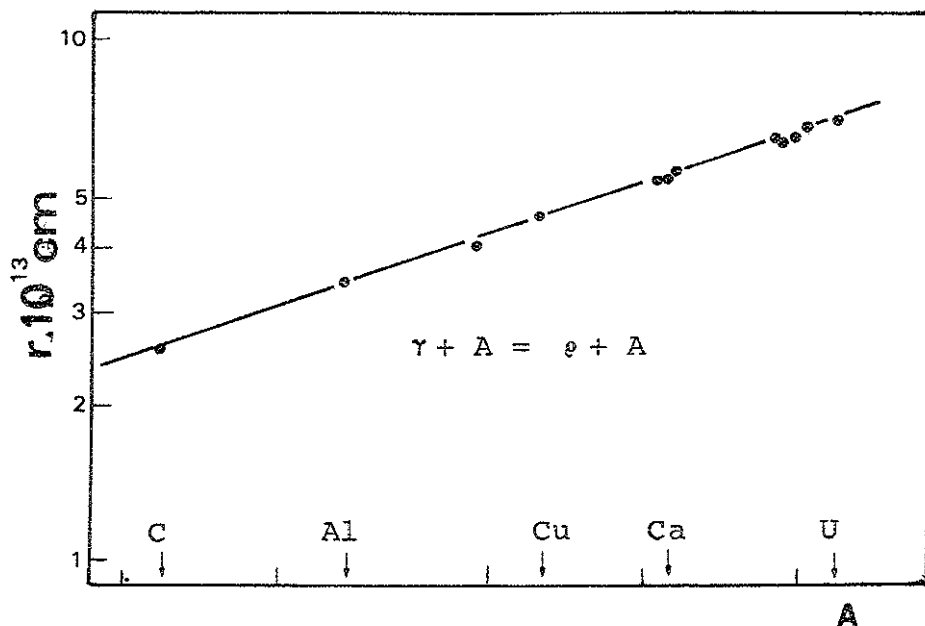


Fig. 84 Le rayon nucléaire en fonction du nombre atomique des éléments déterminé par la photoproduction d'un méson rho (H. Alvensleben, Phys. Rev. Letters, 24, 792, 1970).

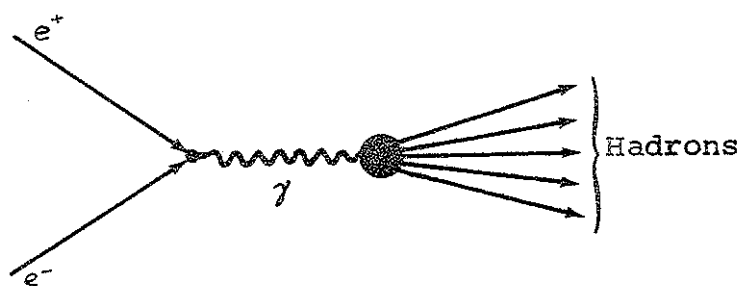


Fig. 85 L'annihilation d'une paire électron-positron en hadrons par l'intermédiaire d'un photon virtuel qui se matérialise en un système hadronique.

des photons par les noyaux a rendu possible la détermination du rayon des noyaux (tels que le photon les voit) qui est donné par une formule ⁽⁴⁷²⁾ (fig84):

$$R = 1,12.A^{1/3} \text{ fermis} \quad (\text{XI.1})$$

très voisine de celle obtenue par la diffusion des électrons.

L'entrée en opération des anneaux de collision e^+e^- a donné lieu à toute une série de recherches qui sont encore en plein développement; la matérialisation du photon virtuel intermédiaire produit par cette annihilation, conduit entre autres à la production de systèmes hadroniques plus ou moins complexes ($p\bar{p}$, mésons vectoriels, etc).

Un des processus les plus étudiés actuellement est l'annihilation en hadrons (fig. 85).

$$e^+ + e^- = \text{hadrons}$$

conjointement avec l'annihilation en une paire de muons :

$$e^+ + e^- = \mu^+ + \mu^-$$

En effet certaines théories, ainsi que le modèle des partons, prévoient que le rapport des sections efficaces de ces deux processus doit tendre, aux grandes énergies, vers une valeur constante, dépendant du modèle :

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- = \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- = \mu^+ + \mu^-)} = \text{const.}$$

Les mesures actuellement disponibles ne sont pas incompatibles avec $R = 6$ vers 5 GeV, mais la précision n'est pas suffisante pour affirmer la constance ni la valeur numérique de ce rapport ⁽⁴⁷³⁾.

XI.1 LA DIFFUSION PROFONDEMENT INELASTIQUE

L'étude de la diffusion inélastique électron-proton a connu un nouvel essor à partir de 1966, époque à laquelle plusieurs accélérateurs sont en état de produire des faisceaux d'électrons de grande énergie (21 GeV à Stanford). Un premier beau résultat a été présenté par les physiciens de Hamburg (DESY) à la conférence de Stanford (1967) ⁽⁴⁷⁴⁾; la figure 86 représente ces mêmes résultats pris en 1969 à 4,88 GeV (sans corrections radiatives). A côté d'un fort pic élastique qui déborde le cadre de la figure, on voit au moins trois autres pics, correspondant aux différents états excités du proton (résonances), puis plus à gauche un fond continu assez plat commence à se manifester; c'est la région dite de la diffusion profondément inélastique (deep-inelastic scattering). Le phénomène est mieux visible sur la figure 87, obtenue à Stanford (SLAC) ⁽⁴⁷⁵⁾ en 1969, qui mérite que l'on s'y arrête. Le rapport de la section efficace mesurée à celle donnée par la formule de Mott, est porté en fonction du carré de la 4-impulsion $q^2 = 4EE' \sin^2 \left(\frac{\theta}{2}\right)$ transférée au système hadronique pour trois valeurs de la masse W de ce système, qui est donnée par la formule :

$$W^2 = M^2 - q^2 + 2M\nu \quad (\text{XI.2})$$

où M est la masse du proton et ν la différence $E-E'$ entre les énergies de l'électron entrant et sortant, c'est-à-dire l'énergie transférée au système hadronique. Contrairement à ce qui se passe pour la diffusion élastique, dont la section efficace décroît très vite quand q^2 croît, dans le cas présent la section efficace varie peu avec q^2 et reste du même ordre de grandeur que la section efficace de Mott, qui, comme on se rappelle, se rapporte à un objet ponctuel. Considérons donc le plan (q^2, ν) ; dans ce plan les droites passant par l'origine sont des lignes à :

$$\omega = 2M\nu/q^2 = \text{constant} \quad (\text{XI.3})$$

et la droite passant par l'origine et ayant pour équation $W = M$ est la ligne correspondant à la diffusion élastique; la région du plan comprise entre

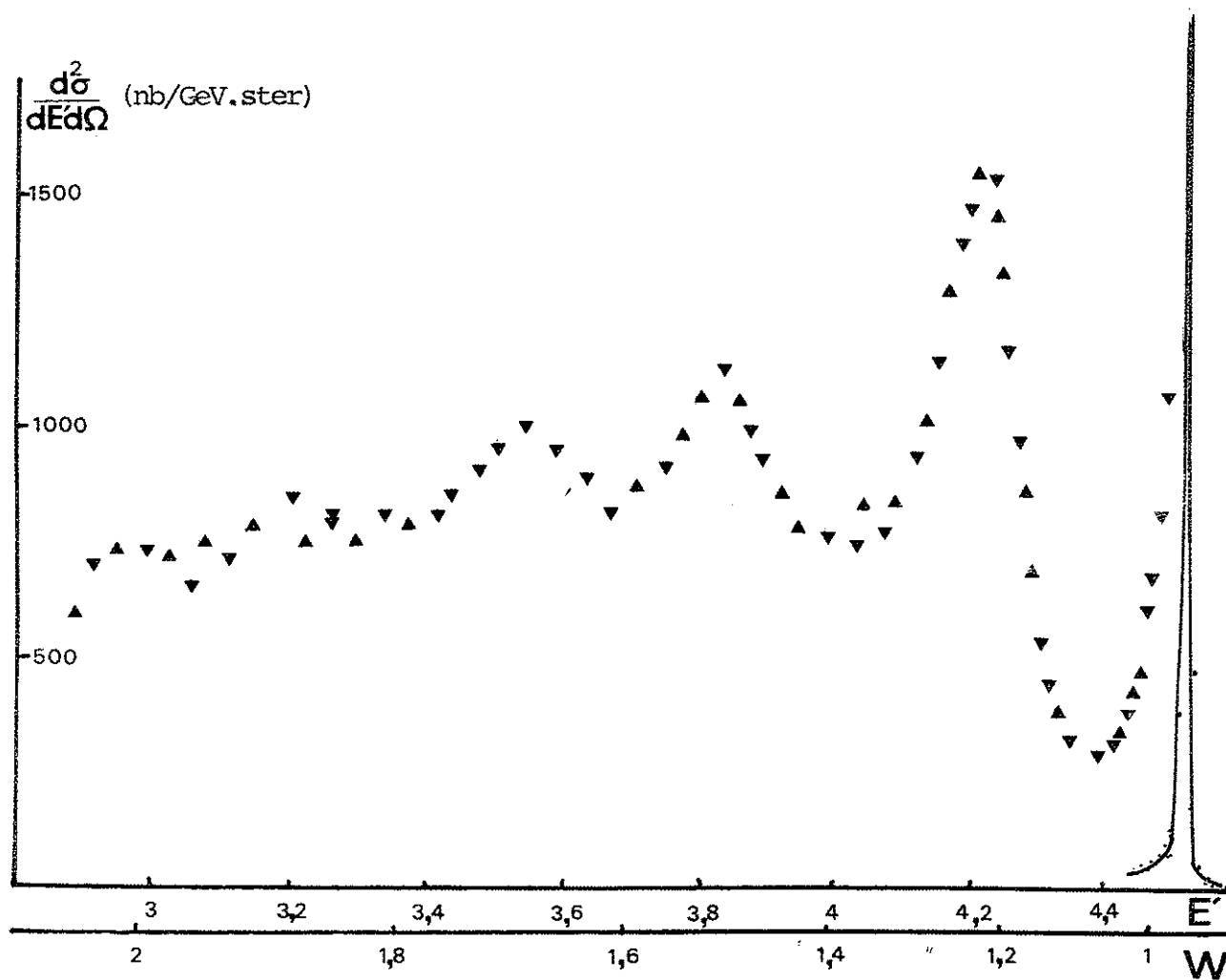


Fig.86 Spectre de masse du système hadronique produit par la diffusion à 10° d'un faisceau d'électrons de 4,88 GeV dans une expérience à DESY (Hamburg). E' =énergie de l'électron diffusé, W =masse invariante du système hadronique. Le pic élastique correspond à $W=0,938$.

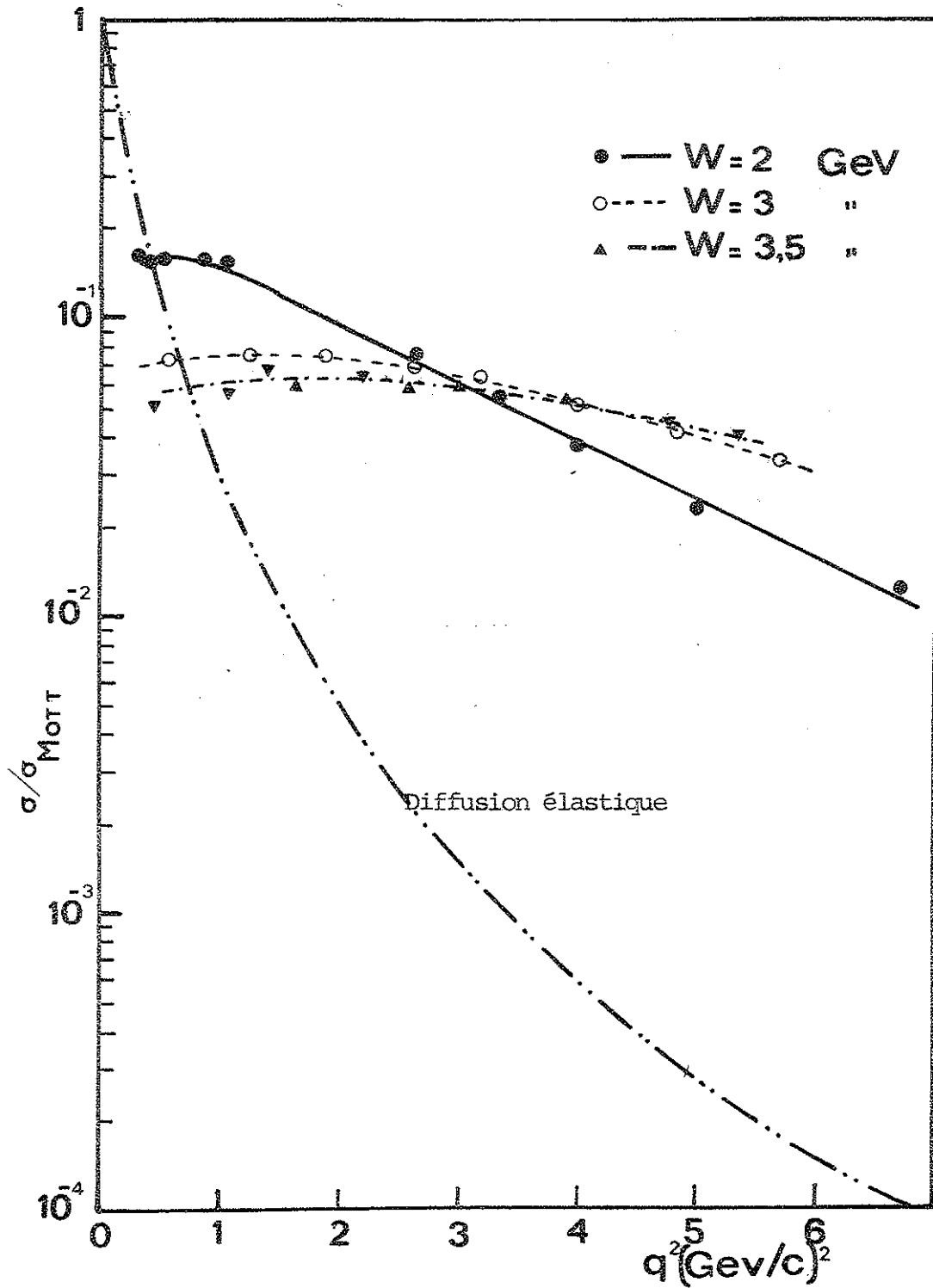


Fig. 87 Section efficace de la diffusion e^-p en fonction du quadriment transféré au système hadronique.

la droite élastique et la parallèle à celle-ci correspondant à $W = \sqrt{2}$ GeV est la région des résonances. Toutes les autres droites parallèles à celles-ci, $W = \text{const.}$ correspondent à des masses de plus en plus grandes du système hadronique. Les lignes à angle de diffusion constant, sont des droites inclinées sur les axes qui se coupent en un point qui détermine W . Comme la

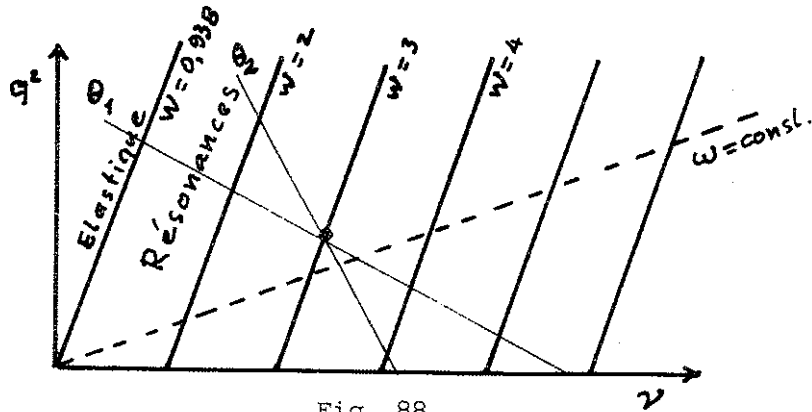


Fig. 88

formule donnant la section efficace (doublement différentielle) est de la forme :

$$\frac{d^2\sigma}{dE' \cdot d\Omega} = \frac{4E'^2 \alpha^2}{q^4} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ 2W_1(q^2, \nu) \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + W_2(q^2, \nu) \right\} \quad (\text{XI.4})$$

on voit que pour les très petits angles ($\theta \sim 0^\circ$) on mesure uniquement W_2 et pour les grands angles ($\theta \sim 90^\circ$) on mesure uniquement W_1 , qui sont deux fonctions de structure analogues à celles de la formule de Rosenbluth, qui ne dépendent que des variables q^2 et ν . ($\alpha = 1/137$ et on a négligé la masse de l'électron).

Si donc on intègre sur ν pour une valeur fixe de q^2 , on obtient une section efficace qui est du même ordre de grandeur que la section efficace de Mott. Tout semble donc se passer comme si la diffusion avait lieu sur un ou plusieurs centres ponctuels, tandis que nous savons que le proton est un objet ayant une certaine extension avec un rayon de l'ordre du fermi. (10^{-13} cm).

Cet étonnant résultat, avec des considérations sur la faible valeur de l'impulsion transverse ($> 0,5 \text{ GeV}/c$) constatée expérimentalement sur les interactions fortes hadron-hadron, a conduit Feynman à la formulation du modèle des partons.

Une autre manière de voir les choses consiste à porter, comme sur la figure 89, la fonction de structure $\nu W_2(q^2, \nu)$ en fonction d'une autre variable $\omega' = (W^2 + q^2)/q^2$ pour différentes valeurs de q^2 ; pour les faibles valeurs de q^2 , on voit bien les pics des différentes résonances, mais au fur et à mesure que q^2 augmente, ces structures se tassent de plus en plus vers l'origine et finalement il n'en subsiste qu'un fond continu sans structure. De plus, la fonction νW_2 semble tendre vers une limite constante, un comportement prévu théoriquement par Bjorken⁽⁴⁶⁸⁾ pour q^2 ($\nu \rightarrow \infty$ et ν/q^2 fini) et connu sous le nom d'invariance d'échelle. Un comportement analogue est aussi prévu pour la fonction W_1 . D'après cette invariance et sous les conditions précédentes, ces deux fonctions doivent tendre vers des fonctions universelles de la seule combinaison ν/q^2 des variables. Comme la figure 90 le suggère (y sont portés les résultats les plus récents)⁽⁴⁷⁶⁾ cette invariance d'échelle semble s'installer bien plutôt que la prophétie de Bjorken ne l'exige, malgré les grandes incertitudes des mesures. On parle dans ce cas d'invariance d'échelle précoce.

Des résultats analogues ont été obtenus par la diffusion positron-proton et muon-proton, ce qui constitue un autre test de l'hypothèse de l'universalité électron-muon. De plus l'égalité des sections efficaces électron-proton et positron-proton milite en faveur de la validité de l'hypothèse d'un seul photon échangé pendant ces processus.

L'étude de la structure des nucléons nécessite évidemment des mesures sur le neutron; en absence de cibles de neutrons on a alors recours au deutérium et l'on extrait les fonctions de structure du neutron par une procédure de soustraction qu'il serait trop long à décrire ici.

Les résultats expérimentaux peuvent se résumer ainsi :

Les fonctions de structure du deutérium sont compatibles avec

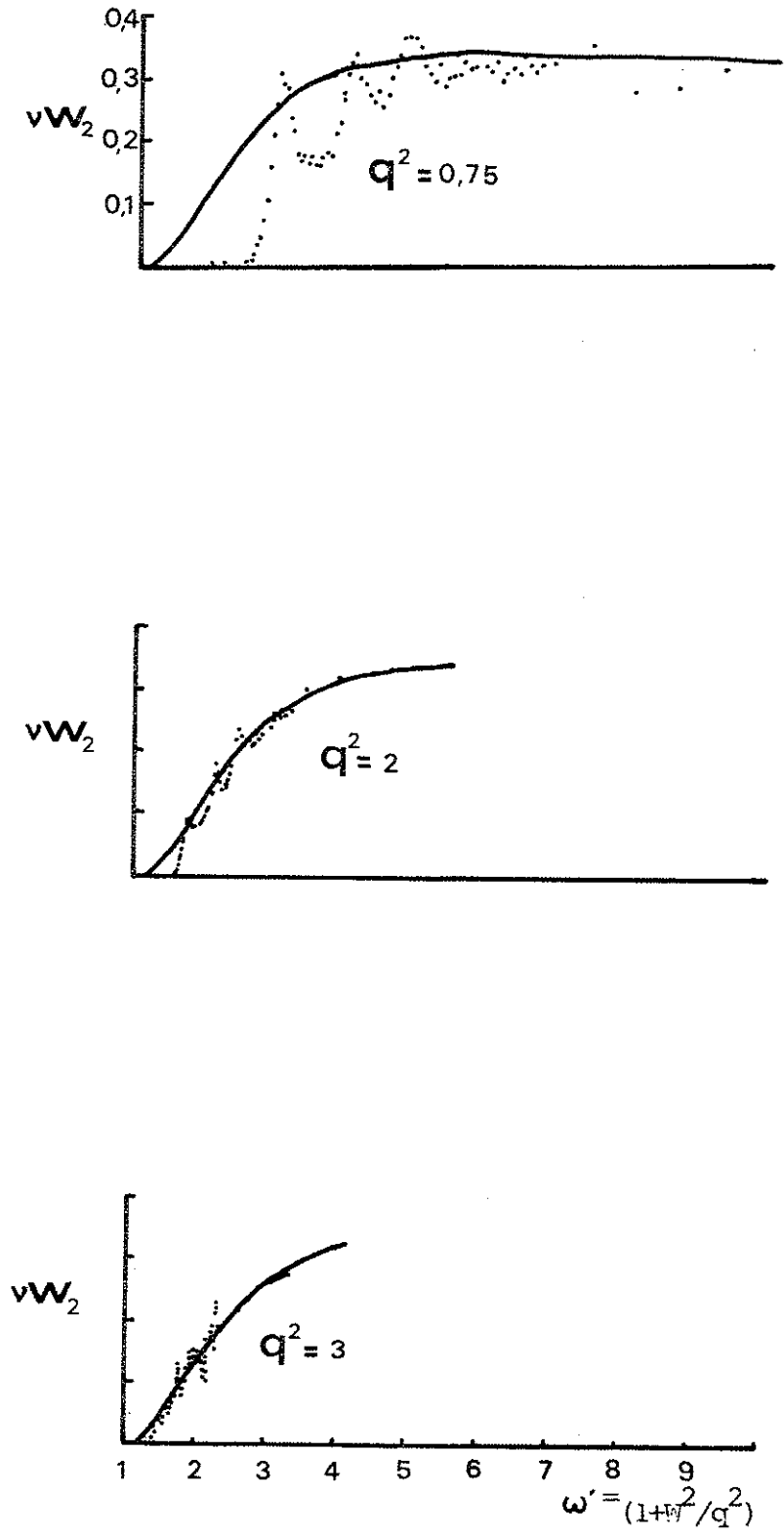


Fig. 89 La deuxième fonction de structure du proton.

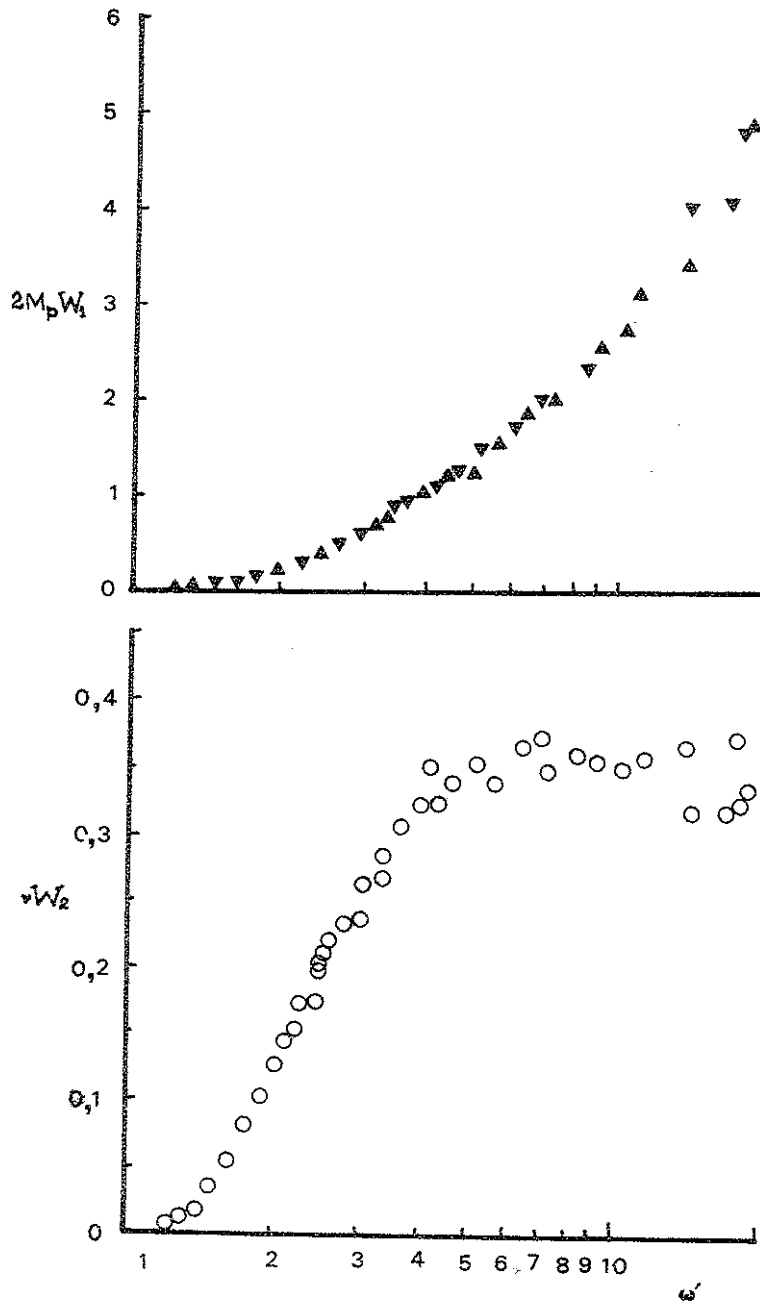


Fig.90 Les deux fonctions de structure du proton dans la région de diffusion inélastique.

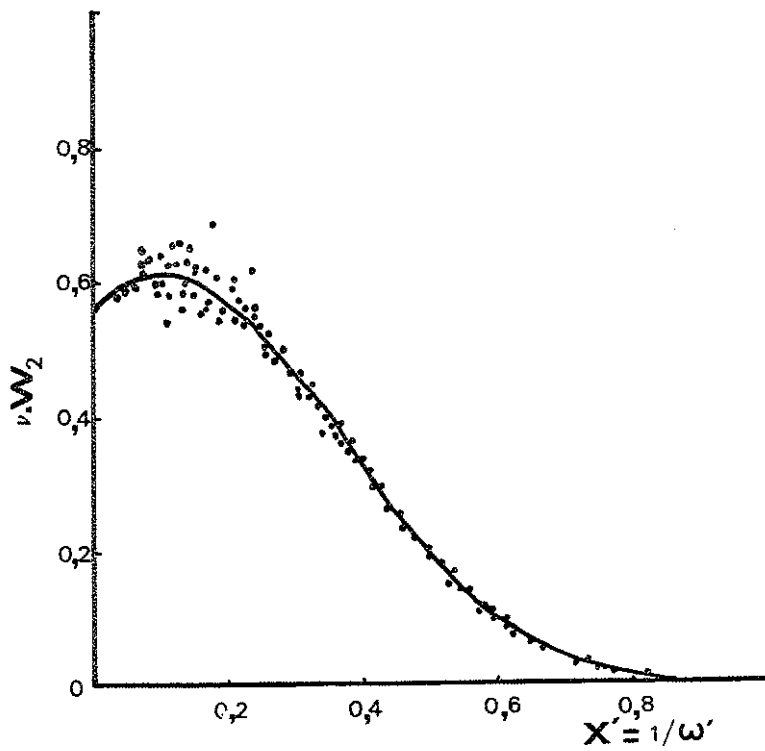


Fig.91 La deuxième fonction de structure du deuterium.

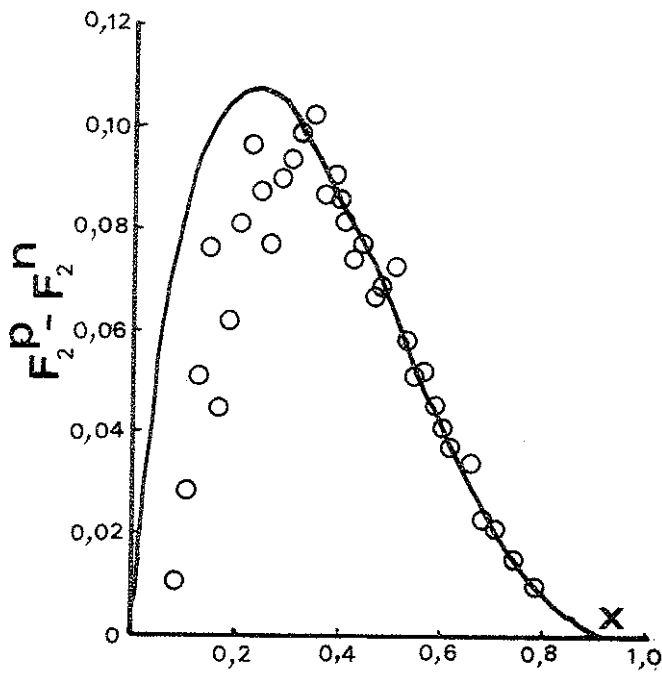


Fig. 92 Différence entre les fonctions de structure du proton et du neutron.

l'hypothèse d'invariance d'échelle. Toutefois la précision est moins bonne pour les cibles à neutrons (fig. 91).

Les fonctions de structure du proton et du neutron sont différentes; cette différence de ~8% atteint son maximum pour $x = 1/\omega = 0,30$ (fig. 92). Il y a donc des différences significatives entre le proton et le neutron.

XI.2 DIFFUSION PROFONDEMENT INELASTIQUE DES NEUTRINOS.

Dans le cas du neutrino et de l'antineutrino, l'expression de la section efficace doublement différentielle fait intervenir, en plus des fonctions de structure W_1 et W_2 , une troisième fonction $W_3(q^2, \nu)$ avec des signes opposés pour chacune de ces particules. L'hypothèse de Bjorken implique que, comme pour les électrons, chacune de ces fonctions de q^2 et de ν tend, sous les mêmes conditions, vers une fonction universelle de la seule variable x ou ω (ou $x' = 1/\omega'$) :

$$\begin{aligned} W_1(q^2, \nu) &\rightarrow F_1(x) \\ \nu W_2(q^2, \nu) &\rightarrow F_2(x) \\ W_3(q^2, \nu) &\rightarrow F_3(x) \end{aligned} \quad (\text{XI.5})$$

Pour des raisons théoriques, on utilise souvent les variables x et $y = \nu/E$. L'intégration de la section efficace différentielle sur x et y , conduit alors, pour la section efficace totale, à l'expression suivante :

$$\sigma_{\text{tot}}(\bar{\nu} \nu) \approx E \cdot \int_0^1 (3F_2 + 2M x F_1 \pm 2 x F_3) \cdot dx/6 \quad (\text{XI.6})$$

(signe + pour l'antineutrino et - pour le neutrino), qui manifeste l'accroissement linéaire avec l'énergie, dont il a déjà été question.

Quant à l'invariance d'échelle, les résultats actuels semblent bien conformes à cette hypothèse dans le domaine des énergies actuellement accessibles, mais des expériences plus poussées sont nécessaires pour corroborer cette hypothèse. Au stade actuel la précision expérimentale n'est

pas suffisante pour affirmer la parfaite validité de l'invariance d'échelle qui est un phénomène asymptotique; il est fort possible qu'aux énergies plus grandes des déviations importantes interviennent. Les expériences actuellement en cours apporteront dans un avenir pas très lointain des précisions sur ce problème, mais il n'est pas impossible que des surprises inattendues viennent bouleverser la situation. Le moment n'est pas aux prophéties et il faut attendre l'exploration patiente et pas-à-pas à des énergies de plus en plus grandes avant de pouvoir tirer des conclusions valables.

XII - LE MODELE DES PARTONS.

Ce modèle qui connaît une grande vogue pendant ces dernières années, a été formulé par R. Feynman⁽⁴⁷⁷⁾ pour tenter de donner une explication des faits expérimentaux observés dans la diffusion inélastique aux grandes énergies. Comme son auteur le dit⁽⁴⁷⁸⁾ "the parton theory is a conglomeration of rather imprecise ideas" et a été conçu originalement pour essayer de comprendre la raison pour laquelle, dans les collisions des hadrons de haute énergie, la composante transverse de l'impulsion des particules produites était sévèrement limitée à des faibles valeurs ($v \approx 400$ GeV/c). Après les premiers résultats du SLAC sur la diffusion profondément inélastique des électrons sur les protons "I saw", précise Feynman, "that the experiments were tailor made for investigating partons and were easy to interpret them in terms of the picture I had already developed for the strong interactions. The deep-inelastic scattering experiments can identify the kinds of partons and how they are distributed, whereas, as yet, I see no clear way to do this from a study of hadronic collisions".

Tout ce que l'on sait sur ces partons, c'est qu'ils sont sensés être les constituants ultimes de la matière; il s'agit donc de particules ponctuelles, qui doivent correspondre aux quanta de la théorie sous-jacente, qui peut être construite mathématiquement de manière à rendre compte des faits observés, en identifiant par exemple les hypothétiques partons avec les non moins hypothétiques quarks (simples ou colorés). Ainsi la diffusion d'un électron sur un proton à très grande énergie peut être regardée comme une diffusion de l'électron sur un parton libre à l'intérieur du proton.

En se plaçant dans un référentiel dans lequel le proton possède une impulsion pratiquement infinie (comme c'est le cas dans une collision e-p à très grande énergie, vue dans le système du centre de masse) le proton subit la contraction de Lorentz et l'électron est diffusé instantanément sur un parton qui, à cause de la dilatation du temps, a un mouvement propre très lent à l'intérieur du proton (fig. 93).

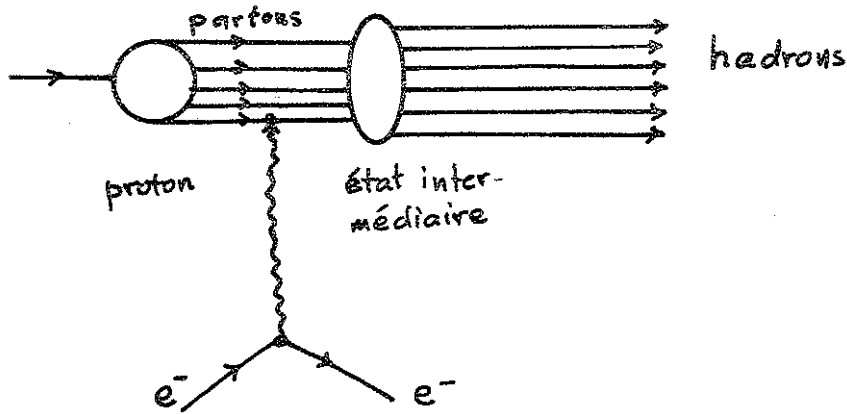


Figure 93

Si donc le temps de l'interaction e^- - parton est très petit par rapport à la vie moyenne de l'état intermédiaire (virtuel) formé, on peut considérer les partons comme libres pendant le temps d'interaction; si de plus le 4-moment transféré est aussi très grand par rapport à la masse du proton, la diffusion sur les partons individuels sera incohérente, par suite de quoi la section efficace de diffusion globale sera la somme des contributions individuelles, pondérées par la charge et l'impulsion de chaque parton. En considérant la proton comme un agrégat de N partons avec la probabilité $P(N)$, chaque parton ayant une fraction x_i de l'impulsion du proton P et une charge électrique Q_i , on peut calculer les sections efficaces totales et les différentes fonctions de structure et trouver plusieurs relations importantes susceptibles d'être testées expérimentalement.

Ainsi Feynman a pu montrer que la fonction de structure νW_2 prend la forme :

$$\nu W_2(q^2, \nu) = P(N) \langle Q_i^2 \rangle_N \cdot f_N(x_i) = F_2(x)$$

où $f_N(x_i)$ est la probabilité de trouver dans le proton un parton du type i avec une fraction $x_i = P_i/P$ de l'impulsion du proton. Si les partons possèdent un spin $1/2$ et si l'hélicité est conservée pendant l'interaction, le parton interagissant absorbe le photon, renverse sa direction sans changer d'énergie et le parton, dont la direction est inversée, absorbe une unité de moment angulaire pour conserver son hélicité, on se trouve donc dans la situation suivante (fig. 94) (dans le système de Breit) :

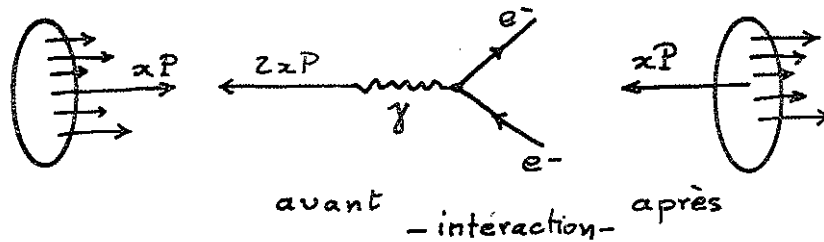


Figure 94

Un tel parton ne peut donc contribuer qu'à la partie longitudinale de la section efficace, ce qui est conforme à l'expérience, puisque le rapport de la section efficace longitudinale sur la section efficace transverse est voisin de zéro.

Tous les partons chargés doivent donc avoir un spin $1/2$.

Si maintenant on identifie les partons avec les quarks, il est possible de calculer théoriquement le nombre des quarks et d'antiquarks dans le proton; il se trouve que ce nombre est très voisin de 3 pour les quarks, avec une contribution quasi-nulle d'antiquarks, ce qui est parfaitement satisfaisant. Comme le contenu en quarks du proton et du neutron est différent, cela explique aussi la différence entre les facteurs de forme de ces particules.

Quant à l'invariance d'échelle des fonctions de structure, elle découle naturellement du modèle des partons-quarks, ainsi que plusieurs relations importantes entre ces fonctions de structure (règles de somme d'Adler, Llewellyn-Smith etc).

Des calculs plus poussés montrent que le pourcentage des quarks du type u est de 33%, du type d de 16% pour le proton qui serait ainsi composé de deux quarks u et un quark d.

On arrive même à calculer, à l'aide des données de l'électroproduction (sensible à la charge des partons), que la charge des partons est très voisine de $1/3$, ce qui est un très bon argument pour identifier partons et quarks.

Toutefois il semble que les partons chargés n'emportent que $\sim 50\%$ de l'impulsion totale, d'où la nécessité d'inventer des partons neutres qui n'entrent pas en interaction avec les courants, leur fonction étant d'emporter le reste de l'impulsion. Ces quanta neutres qui assurent la liaison des trois quarks dans le nucléon tout en emportant l'impulsion manquante, ont reçu le nom de gluons⁽⁴⁷⁹⁾ et ils possèdent (probablement) un spin 1*.

Le nombre de ces gluons peut être très grand; on dit alors que les trois quarks (quarks de valence) sont immergés dans une mer de gluons (contenant éventuellement des paires quark-antiquark). D'autres théories se contentent de 8 sortes de gluons.

Il existe sur les modèles des partons une bibliographie très abondante⁽⁴⁸⁰⁻⁴⁸³⁾ à laquelle on peut avoir recours pour avoir une vue plus large sur les différents problèmes posés. Ainsi, par exemple, dans le modèle de Kuti-Weisskopf le nucléon est considéré comme un sac (bag model) contenant trois quarks de valence et un coeur constitué d'un nombre indéfini de paires quarks et antiquarks en mouvement libre, auxquels il est nécessaire d'ajouter des gluons neutres qui sont les quanta du champ de force entre quarks. On peut imaginer qu'à l'intérieur d'un hadron les quarks échangent de façon continue des gluons de masse nulle; un quark, en émettant un gluon, change de couleur sans changer de nature (un quark d reste d). Dans le langage de Glashow⁽⁴⁸⁴⁾ on dit que le quark change de couleur mais pas de saveur** ; par contre l'interaction faible est capable de changer la saveur sans modifier la couleur du quark.

Si alors il existe un quark charmé (quatrième saveur), l'interaction d'un neutrino avec un proton peut transformer un quark d en un quark charmé c, en donnant un muon et une particule charmée.

Une des principales difficultés de ces modèles est que les quarks et les gluons n'ont pas pu être détectés malgré les nombreuses recherches effectuées dans les plus grands laboratoires. On a alors essayé d'inventer des mécanismes de confinement capables de les maintenir de façon permanente dans le nucléon. Plusieurs mécanismes de ce genre ont été proposés; ils sont, bien entendu, tous hautement spéculatifs.

Ainsi, suivant Kogut et Susskind⁽⁴⁸⁵⁾, on peut supposer que la force (de l'interaction forte) entre quarks de couleur différente, au lieu de diminuer avec la distance, reste constante. Il serait, dans ces conditions, très difficile d'isoler un quark coloré, ce qui nécessiterait un apport d'énergie considérable (~ 1000 GeV). Un moindre apport d'énergie aurait alors pour effet d'augmenter l'énergie potentielle du système, à partir de laquelle une paire quark-antiquark peut être formée. Or une telle paire n'est autre chose qu'un méson (quark et antiquark de couleur); il est par conséquent impossible d'observer un quark isolé. On peut visualiser les choses de la manière suivante⁽⁴⁸⁴⁾:

Les trois quarks sont maintenus à l'intérieur du nucléon par trois cordes (strings) également tendues; un apport d'énergie a pour effet de tendre encore plus une des cordes presque jusqu'à la rupture. A ce moment une paire quark-antiquark est formée au dépens de l'énergie potentielle; elle s'éloigne sous la forme d'un méson et la corde reprend son état initial (fig. 95).

Il faut évidemment se bien garder d'attacher à une telle image plus d'importance que celle d'une représentation intuitive des choses.

Ainsi on se trouve, à force d'abstractions, devant un monde très simple de particules élémentaires : il n'y a de vraiment élémentaire que quelques quarks (3, 6, 9, 12..... selon les théories) et les quatre leptons

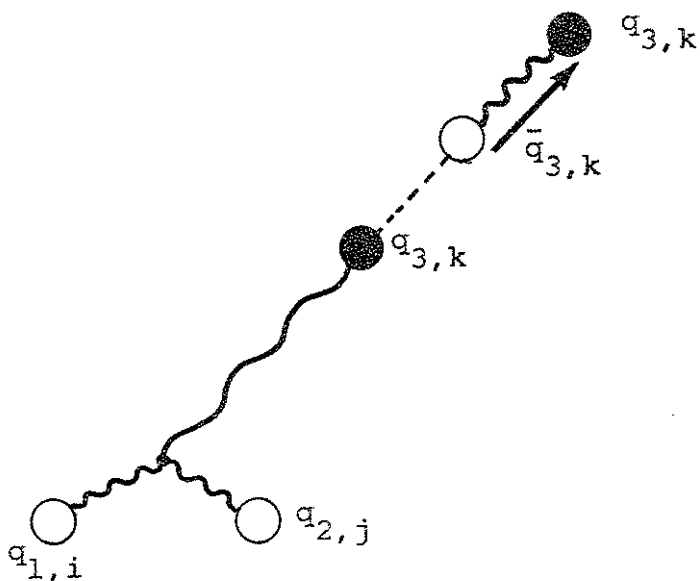


Fig. 95 Un mécanisme pouvant empêcher l'isolement d'un quark coloré à l'état libre. La troisième corde qui est plus tendue que les autres ne se rompt pas, mais il se forme une paire $q\bar{q}$ (méson) et le quark 3,k revient à sa position initiale.

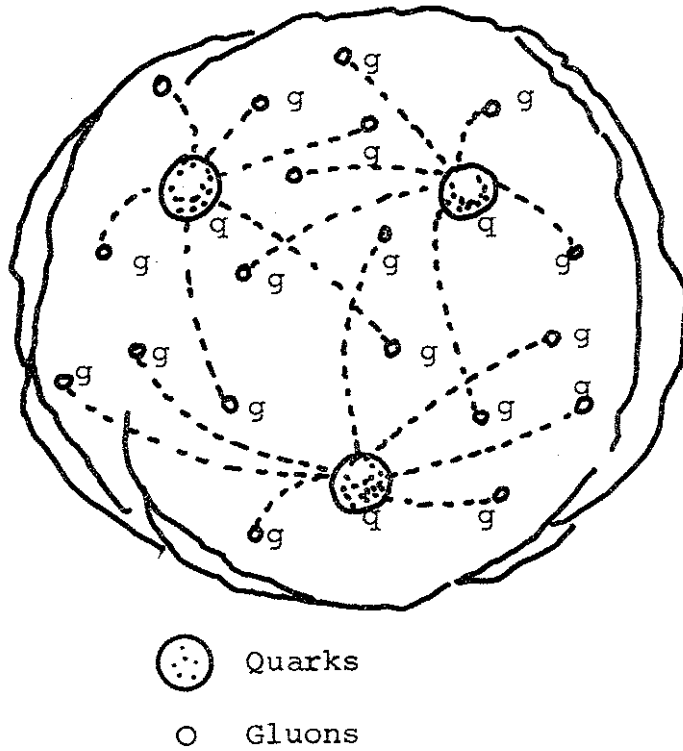


Fig. 96 Le nucléon dans le modèle du sac de M.I.T.
Les trois quarks de valence sont noyés dans un
sac de gluons dont le champ ne va pas plus loin
que la peau du sac.

(COURRIER CERN, 15, 385, 1975)

(électron, muon et leurs neutrinos).

Encore ne faut-il pas, en ces matières, jouer trop au prophète; rien n'assure que les quarks et les leptons sont des objets ponctuels sans aucune structure. Il faut néanmoins avouer que ce modèle ne manque pas d'élégance ni de simplicité. On croit revenir à une situation analogue à celle des années 30, où toute matière était composée de protons et d'électrons; maintenant deux quarks, d et u , l'électron et son neutrino, sont suffisants pour construire toute la matière ordinaire. De plus une certaine symétrie est établie entre quarks et leptons, mise à part la question des masses et des charges électriques, puisque l'interaction faible transforme un quark d en u et un électron en neutrino.

XIII - VERS UNE THEORIE UNIQUE DE TOUTES LES INTERACTIONS.

Dès l'apparition de la pensée rationnelle le souci constant de l'homme fut de chercher à expliquer tous les phénomènes qui se déroulent dans la nature à l'aide d'une théorie unique, cohérente, capable d'embrasser cette immense variété dans un schéma satisfaisant pour la pensée. Sans avoir à recourir aux différents systèmes élaborés dans l'antiquité, on sait que dans les temps modernes Newton aurait voulu tout expliquer avec la seule aide de l'attraction universelle; la grande synthèse des phénomènes électriques et magnétiques de Faraday et de Maxwell est un autre stade de cette tentative dans le sens de l'unification. Au début de ce siècle Lorentz pensait qu'une description de tous les phénomènes serait possible sans faire intervenir d'autre agent que l'électron et on connaît le souci constant d'Einstein, Hilbert et tant d'autres physiciens pour une géométrisation de la physique et l'incorporation de l'électromagnétisme dans la théorie de la gravitation. Avec l'apparition des phénomènes nucléaires Fermi d'une part et Yukawa de l'autre, ont construit des théories des interactions entre particules nucléaires, constamment guidés par des analogies avec l'électrodynamique. Nous avons vu qu'ils ont réussi partiellement seulement, le premier pour les interactions faibles et le second pour les interactions fortes; l'analogie s'est avérée avoir ses propres difficultés à commencer par l'électrodynamique quantique.

En effet ce n'est que vers les années 50 que les difficultés présentées par l'électrodynamique quantique ont pu être résolues de manière satisfaisante, grâce aux travaux de Schwinger, Dyson, Feynman et Tomonaga parmi d'autres, qui ont montré que toutes les divergences de la théorie peuvent être éliminées et qu'il est possible de poursuivre les calculs à tous les ordres par une redéfinition de la masse et de la charge de l'électron (renormalisation).

On dit alors que les théories de ce genre sont renormalisables.

D'autre part on sait depuis longtemps que l'électrodynamique est une théorie invariante de jauge (la divergence du courant est nulle, ce qui entraîne la conservation de la charge électrique).

La particule de jauge est, dans ce cas, le photon, dont la masse est nulle.

Par contre l'interaction faible ne conserve pas la charge électrique (un neutron se transforme en proton et un neutrino se transforme en un lepton négatif) et n'est pas invariante par la transformation parité. La théorie de Fermi rendait bien compte des différents processus de basse énergie, comme la radioactivité β , mais donnait un comportement explosif des sections efficaces à haute énergie, violant la limite d'unitarité au delà de 300 GeV. Elle présentait en plus le défaut grave de ne pas permettre des calculs aux ordres supérieurs qui conduisaient à des infinis, impossibles à éliminer par une procédure de renormalisation.

La théorie n'était pas renormalisable et malgré les bons résultats qu'elle fournissait à basse énergie, elle n'était qu'une théorie phénoménologique.

La formulation de la théorie sous la forme d'une interaction courant-courant par Feynman et Gell-Mann, faisait encore ressortir une certaine analogie avec l'électrodynamique quantique et l'introduction du boson intermédiaire W , en tant que porteur de la force faible, atténuait quelque peu le comportement indésirable des sections efficaces à haute énergie, mais,

malheureusement, faisait apparaître d'autres divergences tout aussi catastrophiques.

Ce boson intermédiaire présente en même temps un grand avantage et un désavantage : c'est une particule vectorielle, comme le photon, mais possède une grande masse (~ 37 GeV). Cette grande masse détruit l'ancienne conception de l'interaction faible ponctuelle en faveur d'une interaction non-locale et de faible portée.

Un moyen de sortir de cette situation inconfortable a été suggéré par Weinberg et Salam^(471,486) qui ont proposé de considérer le photon et le boson intermédiaire W comme des quanta des champs vectoriels de Yang et Mills⁽⁴⁸⁷⁾ obéissant à une invariance de jauge locale, pourvu que la théorie sous-jacente soit renormalisable. Les quantas des champs de Yang et Mills sont des bosons de masse nulle (bosons de Goldstone), mais Higgs, Kibble et d'autres ont montré⁽⁴⁸⁸⁾ que ces particules peuvent acquérir une masse par rupture spontanée de la symétrie. Ce mécanisme de Higgs pourrait expliquer la différence de masse entre le photon et le W (le photon appartiendrait à un sous-groupe de symétrie parfaite, associée à la conservation de la charge électrique) et de surcroît donnait l'espoir de pouvoir construire une théorie renormalisable. Effectivement t'Hooft⁽⁴⁸⁹⁾ a pu montrer en 1971 que toute une classe de théories, appelées théories de jauge, peuvent être rendues renormalisables par le mécanisme de Higgs.

(522)

Tout un déluge d'articles théoriques en a découlé. Une première étape du programme semblait se réaliser : l'unification des interactions faibles et électromagnétiques.

Un grand nombre de modèles en a résulté; ils font intervenir tous des particules nouvelles, soit des bosons lourds, soit des leptons lourds, soit les deux à la fois. Un des plus simples est celui de Weinberg, qui, à côté des bosons intermédiaires W^\pm , fait intervenir un nouveau boson lourd neutre Z^0 de masse ~ 75 GeV et bien entendu le photon. Ce modèle présente le grand avantage de ne dépendre que d'un seul paramètre, l'angle θ_W de Weinberg, dont la valeur est assez mal connue actuellement, il pré-

voit de plus l'existence de courants neutres qui, comme nous l'avons vu, ont été effectivement observés, ce qui constitue un support expérimental important pour la théorie.

Une difficulté se présente, si l'on veut incorporer les hadrons dans le modèle tout en évitant l'existence de courants neutres avec changement d'étrangeté. On sait, en effet, que certaines transitions avec changement d'étrangeté sont fortement supprimées, comme c'est le cas, par exemple, pour la désintégration du K^0 en une paire de muons, dont le rapport de branchement est très faible ($\sim 10^{-8}$). Pour ce faire tout en restant dans le cadre de la symétrie SU(3) on utilise l'artifice de Glashow-Iliopoulos-Maiani, en introduisant un nouveau quark p' , possédant un nouveau nombre quantique, le charme. Cela entraîne alors l'existence de toute une classe de particules nouvelles dites charmées. L'introduction du charme (degré de liberté supplémentaire) oblige l'élargissement de la symétrie SU(3) en SU(4) ou en groupe d'ordre supérieur, SU(5)...

Le problème suivant, dans ce même ordre d'idées, est celui de l'incorporation de l'interaction forte. Il y a actuellement des raisons sérieuses de croire que cela est effectivement possible⁽⁴⁹⁰⁾. On conçoit, en effet, que, dans le cadre de certaines théories de jauge, il est possible d'effectuer des calculs analogues à ceux des interactions faibles et électromagnétiques, si aux très grandes énergies l'intensité de l'interaction forte devenait suffisamment faible pour justifier les approximations nécessaires à un tel calcul. Une telle éventualité expliquerait du même coup pourquoi il n'a pas été possible de détecter les quarks au laboratoire : si les forces entre quarks augmentent indéfiniment en fonction de la distance qui les sépare, il serait impossible d'éloigner un quark du nucléon, par exemple, de deux autres qui l'attireraient d'autant plus fortement que la distance devient plus grande.

Somme toute, il n'est pas impossible qu'aux très grandes énergies (et grands transferts d'énergie-impulsion) l'intensité de l'interaction forte devienne du même ordre de grandeur que la force faible et électromagnétique pour des distances très courtes.

L'interaction forte ne nous apparaît comme telle que parce que les énergies actuellement exploitées ne sont pas assez grandes; mais où placer une limite d'énergie ?^{*}

Une chose est certaine : il y a actuellement chez les théoriciens une conviction profonde dans ce sens, qu'une théorie de jauge est capable de décrire toutes les interactions à l'aide d'une seule constante de couplage, dont la valeur décroît asymptotiquement pour les très grandes énergies et tend vers une valeur universelle limite⁽⁴⁷³⁾ (figure 97).

En poussant plus loin l'analogie, il ne serait donc pas impensable que l'interaction forte soit véhiculée par échange d'une ou plusieurs particules appartenant à la même famille que le photon et le W, comme les mésons vectoriels à $J^P = 1^-$ du nonet de SU(3).

Les théoriciens ne désespèrent d'ailleurs pas d'incorporer la gravitation dans un tel schéma (l'hypothétique graviton n'est-il pas l'analogue du méson f de spin-parité 2^{++} ?).

Ces particules de jauge constitueraient ainsi un pont entre les mondes leptonique, hadronique et gravitationnel ! Un seul supergroupe de jauge G et une seule constante de couplage g pourraient, dans un avenir qui ne semble pas éloigné, décrire toutes les forces de la nature. Le seul problème (mais il est de taille) est de choisir convenablement le supergroupe G et de placer toutes les particules (connues et inconnues) dans la représentation appropriée.^{***}

XIV.- UNE NOUVELLE CLASSE DE PARTICULES.

En ouvrant le fascicule n° 23 de Physical Review Letters du 2 Décembre 1974, le lecteur se trouve devant une annonce peu usitée des éditeurs : " ce numéro sera certainement un des plus inhabituels dans notre histoire, à cause non pas d'un seul mais de trois rapports extrêmement stimulants d'une nouvelle découverte". Ces trois rapports se suivent de la page 1404 à la page 1410.

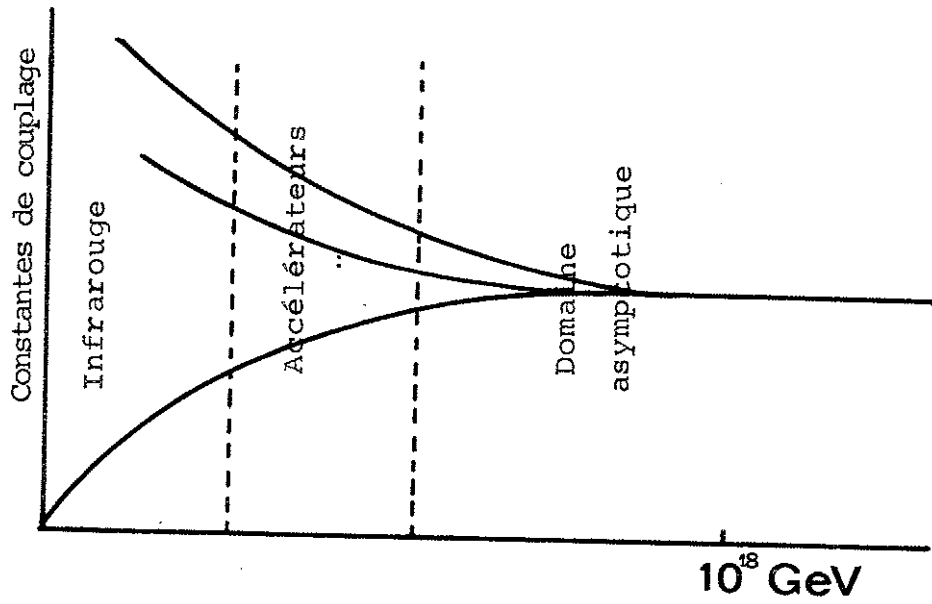


Fig.97 Comportement présumé des constantes de couplage des différentes interactions avec l'énergie.

Pour mieux comprendre la situation, il n'est peut-être pas superflu de faire un petit retour en arrière vers 1970, quand L. Lederman et ses collaborateurs⁽⁴⁹¹⁾, en envoyant un faisceau de protons de 29 GeV sur un cible de béryllium, constatent qu'il se produit, entre autres, des paires de muons positifs et négatifs, dont la masse effective s'étalait entre 1,00 et 6,7 GeV avec une section efficace qui augmentait d'un facteur 5 quand l'énergie des protons incidents passait de 22 à 29,5 GeV.

Un vaste programme d'expériences a été établi par la suite à Brookhaven, en vue d'étudier la production des leptons (muons et électrons) dans les collisions p-p et de rechercher éventuellement des particules nouvelles produites dans ces collisions et se désintégrant en une paire de leptons. Les expériences ont été entreprises par un groupe de M.I.T./ Brookhaven pour étudier le processus:

$$p + Be = e^+ + e^- + X$$

en ne détectant que les électrons émis à 15° de part et d'autre du faisceau incident, à l'aide d'un spectromètre à deux bras et plusieurs autres détecteurs (compteurs Cerenkov, chambres proportionnelles multifils, scintillateurs, etc) afin de pouvoir mesurer l'énergie des électrons. Au mois d'Août 1974 les physiciens ont constaté que le spectromètre enregistrait un nombre anormalement élevé de paires e^+e^- , dont la masse effective était autour de $\sim 3,1$ GeV. Les nombreuses vérifications effectuées sur ces résultats inattendus montraient que l'effet observé était bien réel et vers la fin d'Octobre il y avait un bon nombre (~ 500) d'événements de ce genre, et comme l'énergie de l'accélérateur de Brookhaven (28,5 GeV) permettait d'explorer une région de masse effective e^+e^- allant jusqu'à 5,5 GeV, les physiciens auraient bien voulu terminer tranquillement leur expérience, mais une nouvelle parvenue de la cote Ouest des Etats-Unis les obligea de publier rapidement leurs résultats même partiels. En effet à Stanford un autre groupe de physiciens de Stanford/Berkeley ayant passé l'été à mesurer la section efficace e^+e^- en fonction de l'énergie, par tranches de 200 MeV, aux anneaux de collision SPEAR ($2 \times 2,5 = 5,0$ GeV), ils trouvaient un point légèrement

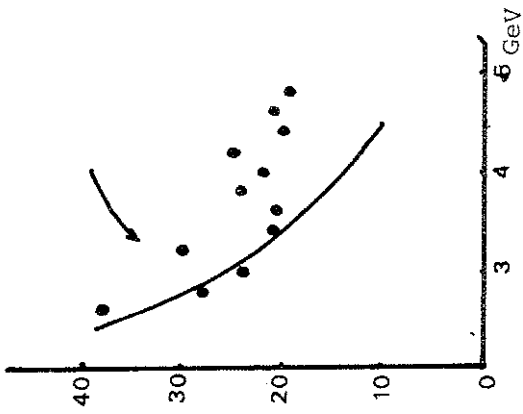


Fig. 99 La section efficace e-p avant la découverte des nouvelles résonances.

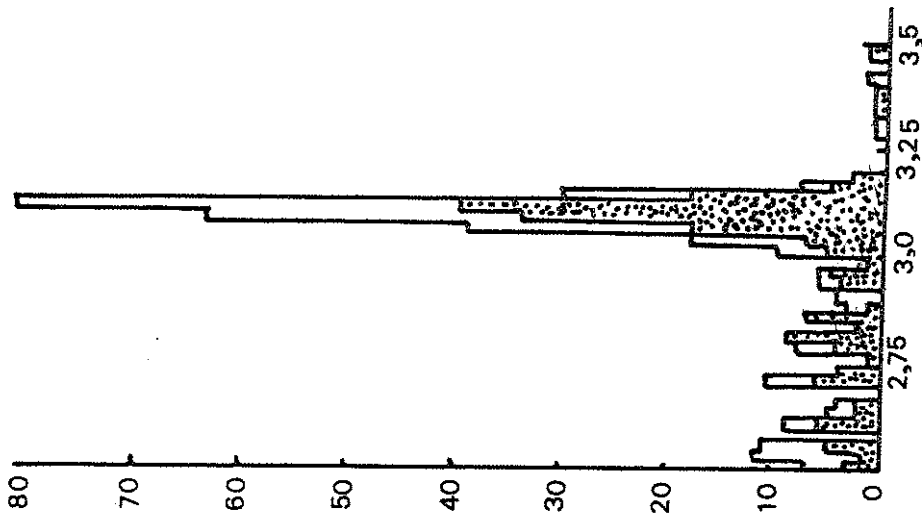


Fig. 98 La masse invariante e^+e^- montrant la résonance J/ψ .

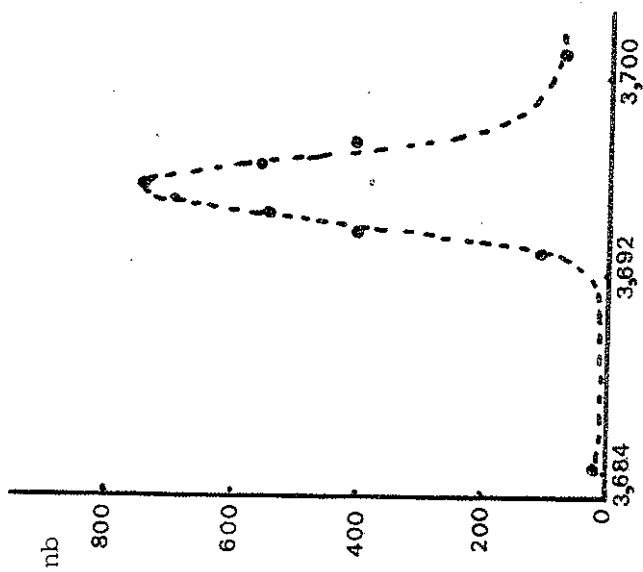


Fig. 101 La section efficace $e^+e^- \rightarrow$ hadrons autour de 3,69 GeV.

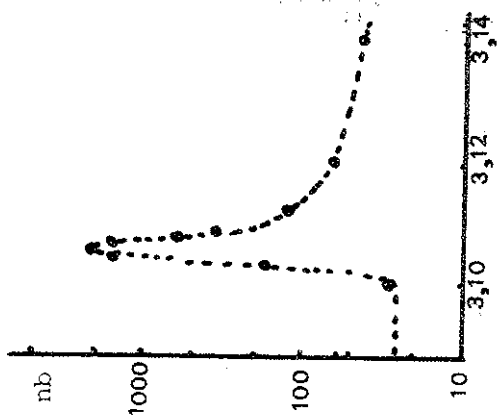


Fig. 100 La section efficace $e^+e^- \rightarrow$ hadrons autour de 3 GeV

aberrant à 3,2 GeV persistant à plusieurs mesures (effet systématique). Ils ont alors décidé de pousser au maximum l'énergie de SPEAR (à $2 \times 3,8 = 8,6$ GeV) et pendant le week-end du 9 au 10 Novembre, ils ont entrepris une nouvelle série de mesures systématiques en faisant varier l'énergie par tranches de 0,5 MeV. Au lieu de la courbe de la figure 99 du mois de Juin, la section efficace entre 3,10 et 3,11 GeV était multipliée par un facteur 10 par rapport aux énergies voisines et G. Goldhaber se retira sous sa tente pour rédiger une courte publication. Pendant ce temps les autres physiciens essaient de figurer les mesures; un coup de pouce par ci, un coup de pouce par là et la section efficace atteignait une valeur 100 fois plus grande (fig. 100). Panofsky, arrivé sur les lieux, n'en croit pas ses yeux et Goldhaber n'a plus qu'à recommencer sa rédaction.

Quelques heures plus tard, les physiciens de Frascati (Italie) et de DESY (Hamburg), se ruent sur ADONE et DORIS; les résultats de Stanford sont aussitôt confirmés⁽⁴⁹²⁾; il s'agit bel et bien d'une nouvelle résonance de masse $m = 3105$ MeV et dont la largeur expérimentale de 1,9 MeV est compatible avec zéro. Un calcul plus précis de la largeur à partir de la surface de la courbe sous la résonance, montre que cette largeur est très faible (80 keV) et par conséquent la vie moyenne de la résonance est de l'ordre de 10^{-20} s, soit 1.000 fois plus longue que pour les résonances habituelles (10^{-23} s).

S.C.S. Ting et son équipe qui travaillaient depuis 10 ans sur le courant électromagnétique ($j_\mu(x)$) ont appelé J cette nouvelle résonance⁽⁴⁹³⁾.

Mais les américains vont vite; les résultats de DORIS ne sont pas encore publiés que Stanford annonce une autre résonance du même type avec une masse $m = 3695$ MeV et une largeur de l'ordre de 0,5 MeV⁽⁴⁹⁴⁾, résonance que les chercheurs de Brookhaven ne trouvent pas dans les collisions p-p⁽⁴⁹⁵⁾.

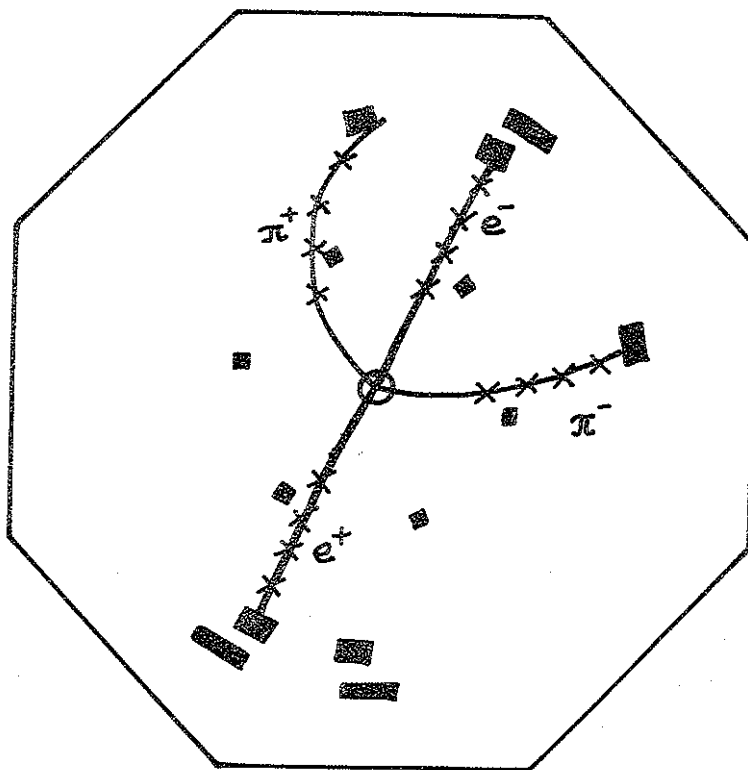


Fig. 102 Reconstruction par ordinateur de la désintégration $\psi'(3695) \rightarrow \psi(3105) + \pi^+ + \pi^-$ suivie de la désintégration $\psi(3105) = e^+ + e^-$ qui est à l'origine de la nomenclature.

La figure 101 traduit les résultats de Stanford; une reconstruction par ordinateur de la topologie de la désintégration de cette résonance, reproduite sur la figure 102, est à l'origine d'une nomenclature différente de celle de Brookhaven; les physiciens de Stanford ont adopté la notation ψ pour la particule J et ψ' pour la nouvelle résonance à 3,695 GeV d'où la notation J/ψ souvent utilisée.

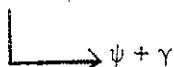
La poursuite de ces recherches a vite montré que la situation dans le domaine des particules ψ était bien plus compliquée. Les mesures à Stanford⁽⁴⁹⁶⁾ de la section efficace :

$$e^+ + e^- = \text{hadrons}$$

dans le domaine d'énergie de 2,4 à 5,0 GeV, a montré qu'il existe une bosse autour de 4,15 GeV, d'une grande largeur (250 - 300 MeV) qui pourrait bien être la superposition de deux ou plusieurs résonances plus étroites. De même l'étude de la désintégration du ψ' a montré⁽⁴⁹⁷⁾ que dans bon nombre de cas ($\sim 32\%$) elle a lieu suivant le schéma :

$$\psi' = \psi + \pi^+ + \pi^-$$

et l'équipe de DORIS a réussi à mettre en évidence le processus⁽⁴⁹⁸⁾ :

$$\psi' = X + \gamma$$


$$\psi + \gamma$$

un processus en cascade passant par l'intermédiaire d'un état X, appelé P_c ; les deux γ émis ont des énergies groupées autour de 200 et 400 MeV, ce qui correspond, suivant l'ordre d'émission, aux valeurs $M_1 = \sim 3500$ MeV ou $M_2 = 3270$ MeV.

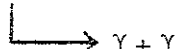
Peu après on établissait à Stanford⁽⁴⁹⁹⁾ le schéma de désintégration

$$\psi' = \chi + \gamma$$

avec $\chi = \pi^+ \pi^-, K^+ K^-, 2\pi^+ 2\pi^-, 3\pi^+ 3\pi^-, \pi^+ \pi^- K^+ K^-$

(χ est un nom générique de tous les états couplés radiativement au ψ). Il semblerait qu'il y ait au moins deux états χ de masse 3410 et 3500 MeV, dont le deuxième pourrait être identique à la particule X(3500) de DORIS.

Plus récemment à DORIS il y a des indications⁽⁵⁰⁰⁾ sur l'existence d'un autre état X de masse $\sim 2,8$ GeV, provenant de la désintégration

$$\psi(3100) = X + \gamma$$


L'étude expérimentale des particules ψ vient d'être à peine commencée*, mais il devient déjà de plus en plus évident que l'on est en présence d'une nouvelle classe de particules qui diffèrent par plusieurs aspects des particules déjà connues. Le fait le plus frappant est leur grande masse (plus de 3 fois la masse du proton) qui contraste étrangement avec leur faible largeur (1000 fois inférieure à celle des résonances), ce qui correspond à une vie moyenne trop longue pour une désintégration forte et trop courte pour une désintégration faible ou électromagnétique.

Il était naturel de songer au début qu'il s'agissait d'un boson intermédiaire, depuis longtemps recherché sans succès, mais la désintégration facile du ψ en hadrons plutôt qu'en leptons exclut cette possibilité. Ces particules sont d'autre part assez facilement formées par photoproduction et cela avec des sections efficaces comparables (à un facteur 10 près) à celles des mésons vectoriels ρ , ω , ϕ et leur distribution angulaire à la désintégration en deux muons (pourvu que la parité soit conservée), sont compatibles avec une particule vectorielle de spin 1, $J^P = 1^-$ qui sont aussi les nombres quantiques du photon virtuel, auquel elles sont couplées (fig. 103)⁽⁵⁰¹⁾.

Comme par ailleurs elles n'ont été vues qu'à l'état neutre, il y a des bonnes chances pour que leur isospin soit nul.

Il semble donc bien qu'il s'agit de particules de nature hadronique formant une classe à part qui ne rentre pas dans le cadre de la symétrie SU(3); d'où la nécessité d'introduction d'un nouveau nombre quantique le charme.

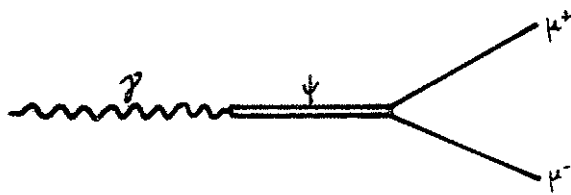


Fig. 103

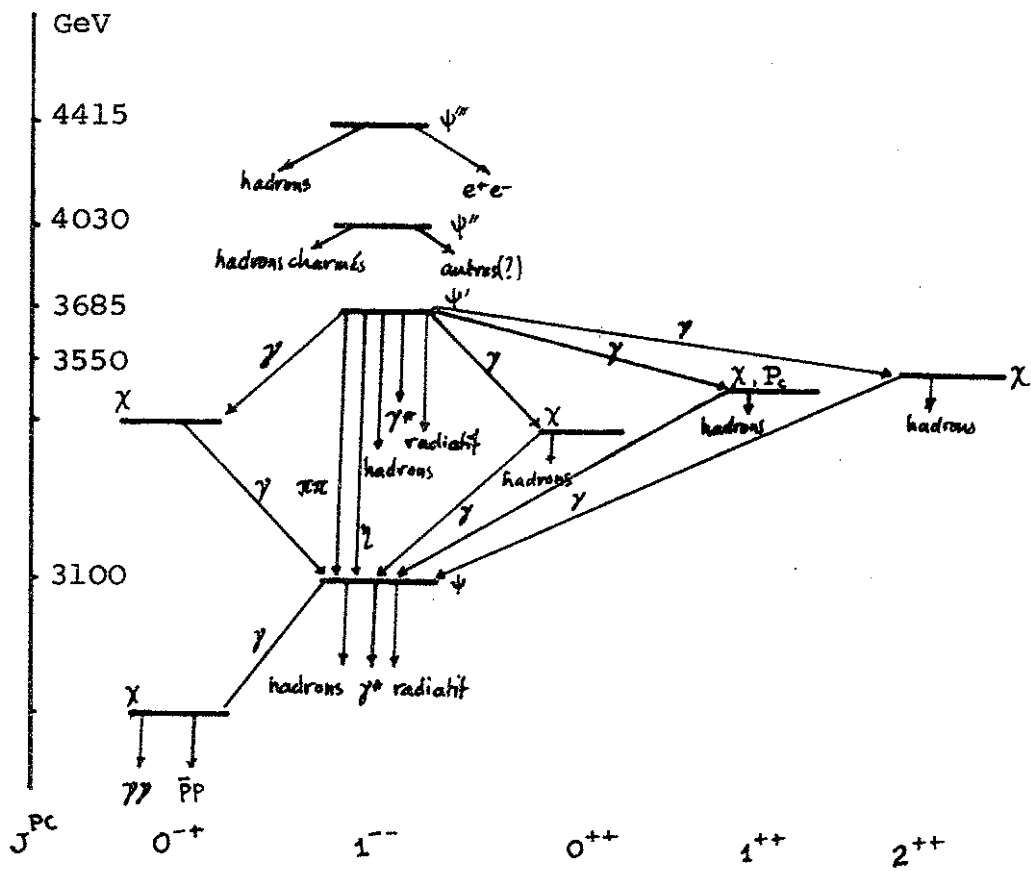


Fig. 104 Etats observés du Charmonium.

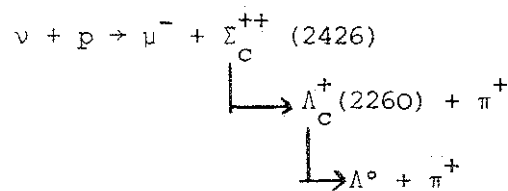
Il existe actuellement un grand nombre de modèles, avec un nombre variable de quarks-antiquarks; ne pouvant pas les mentionner tous, nous retiendrons à titre d'exemple le modèle assez populaire de de Rujula et Glashow⁽⁵⁰²⁾ et leurs collaborateurs. Il consiste à considérer les particules ψ comme des états d'excitation radiale et orbitale de l'atome de charmonium, formé de la combinaison d'un quark et d'un antiquark de charme opposé, c et \bar{c} , dont l'état fondamental serait la particule ψ . Un tel "atome" présente de grandes analogies avec l'atome d'hydrogène ou le positronium et peut exister sous les formes ortho (spins parallèles) et para (spins antiparallèles) et présenter de nombreux états d'excitation radiale et orbitale⁽⁵⁰³⁾ qui correspondraient aux différentes particules ψ connues ou à découvrir (fig. 104).

D'autres possibilités se présentent pour des états mésoniques formés d'un quark charmé et d'un antiquark non-charmé (d, u) ou d'un quark charmé et du quark étrange (s), ce sont les mésons D et F respectivement dont on connaît déjà quelques représentants qui rentreraient bien dans le schéma à quatre quarks SU(4)⁽⁵⁰⁴⁾.

Il doit de même exister des baryons charmés, formés par l'association de trois quarks dont un charmé. On possédait effectivement depuis l'année 1975 quelques indications en faveur de l'existence de tels baryons⁽⁵⁰⁵⁾, mais tout dernièrement les physiciens du CERN ont apporté la preuve convaincante de production d'un baryon (entre 3 événements analogues) de masse 2295 ± 150 MeV et temps de vie $7 \cdot 10^{-13}$ s se désintégrant suivant les schémas⁽⁵⁰⁶⁾.

$$\Lambda_c^+ \rightarrow p \pi^+ K^- , \Lambda^0 \pi^+ \pi^+ \pi^- \text{ ou } K^- \Delta^{++}$$

Un événement quasi semblable avait été publié par les physiciens américains qui trouvent actuellement sur 134.000 photographies une vingtaine d'événements dont huit du type (507/508).



(Les chiffres entre parenthèses indiquent les masses de ces particules).

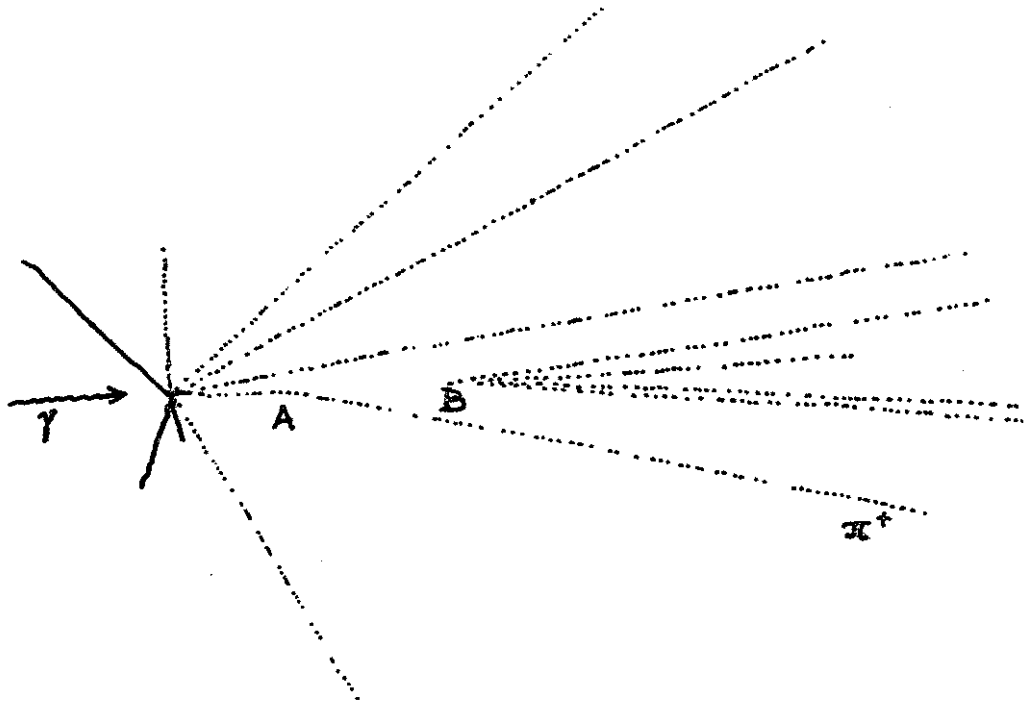


Figure 105 Photoproduction d'une paire de particules charmées :
 $\gamma + \text{Noyau} \rightarrow \Lambda_C^+ + \bar{D}^0 + X$. En A il ya désintégration du $\Lambda_C^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$ (le Λ^0 n'est pas visible); en B il y a désintégration du $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$

La figure 105 reproduit un exemple de photoproduction d'un baryon et d'un méson charmés⁽⁵⁰⁹⁾.

Bien d'autres particules charmées sont prévues théoriquement et la table XIII résume les nombres quantiques et le contenu en quarks des baryons charmés (C étant le nombre quantique de charme) ainsi que la nomenclature proposée⁽⁵¹⁰⁾.

Table XIII Contenu en quarks des baryons charmés

contenu en quarks	I	I ₃	S	C	Q	Symboles	
cuu	1	1	0	1	2	Σ_1^{++}	C_1^{++}
cud	1	0	0	1	1	Σ_1^+	C_1^+
cdd	0	0	0	1	1	Λ_1^+	C_0^+
cdd	1	-1	0	1	0	Σ_1^0	C_1^0
cus	1/2	1/2	-1	1	1	Ξ_1^+	S^+
cds	1/2	-1/2	-1	1	0	Ξ_1^0	S^0
css	0	0	-2	1	0	Ω_1^0	T^0
ccu	1/2	1/2	0	2	2	Ξ_2^{++}	X_u^{++}
ccd	1/2	-1/2	0	2	1	Ξ_2^+	X_d^+
ccs	0	0	-1	2	1	Ω_2^+	S^{++}
ccc	0	0	0	3	2	Ω_3^{++}	θ^{++}

XV. UN TROISIEME LEPTON, LE TAU (τ)

La famille des leptons ne comportait jusqu'à présent que deux particules, découvertes à un demi-siècle d'intervalle, l'électron et le muon (ainsi que leurs antiparticules et les neutrinos et antineutrinos correspondants). D'autre part le comportement de ces deux particules montrait que, la masse mise à part, toutes leurs autres propriétés étaient tellement voisines que le muon pouvait être considéré comme un électron lourd (universalité mu-électron). Cette universalité constitue d'ailleurs un des plus grands mystères de la physique des leptons.

Il semblait donc naturel de chercher à savoir si cette liste des leptons était close ou bien si elle se prolongeait au delà du muon.

Les théoriciens envisageaient plusieurs types de leptons : séquentiels, paraleptons, ortholeptons, particules pénétrantes à longue vie moyenne, à propriétés légèrement différentes (503e, 511). Nous ne retiendrons ici que la notion de leptons séquentielles (L^\pm, ν_L) c'est-à-dire des leptons ayant leur propre nombre leptonique conservé, leur propre neutrino et pouvant se désintégrer suivant les modes permis :

$$\begin{aligned}
 L^- &\rightarrow \nu_L e^- \bar{\nu}_e \\
 L^- &\rightarrow \nu_L \mu^- \bar{\nu}_\mu \\
 L^- &\rightarrow \nu_L + \text{hadrons}
 \end{aligned}
 \tag{XV.1}$$

tandis que les modes radiatifs $e^- \gamma$ et $\mu^- \gamma$ sont interdits.

A priori, il peut en exister toute une suite de tels leptons à masse croissante et de vie moyenne inférieure à 10^{-12} s (pour une masse supérieure

à 1 GeV). A ces leptons séquentiels correspondraient des antileptons (chargés positivement) et des neutrinos et antineutrinos de masse nulle ou non. Malheureusement il n'y a aucun moyen permettant d'avoir une idée sur les masses, ne serait-ce qu'approximatives, de ces particules. Il n'est donc pas étonnant que les expérimentateurs engagés dans les premières recherches de ces particules les aient désignés par la lettre U (unknown).

Le moyen le plus simple de produire de tels leptons est le processus d'annihilation :

$$e^+ + e^- \rightarrow \text{photon virtuel} \rightarrow L + \bar{L} \quad (\text{XV.2})$$

et par conséquent les anneaux de collisions et de stockage SPEAR du SLAC avec leur énergie de 4 GeV par faisceaux permettaient d'entreprendre une telle recherche avec quelque chance de succès (sauf si ces particules avaient une masse plus grande que 4 GeV).

Ainsi en 1974 sur un ensemble de 10 000 événements produits par l'annihilation e^+e^- les physiciens de Stanford isolaient 24 événements ne comportant à l'état final que des électrons et des muons, ce qui semblait conforme aux processus (XV.1) ⁽⁵¹²⁾.

Une patiente récolte pendant deux ans a réuni environ 200 événements de même type dont l'étude a permis de connaître la distribution en énergie des électrons et des muons. Les spectres obtenus étaient compatibles avec une désintégration en trois corps d'un objet qui semblait bien être une particule nouvelle de nature non hadronique ayant une masse entre 1800 et 1900 MeV.

Ces résultats furent immédiatement confirmés par les physiciens de Hamburg travaillant avec les anneaux DORIS ⁽⁵¹³⁾.

Le nouveau lepton, venant en troisième place après l'électron et le muon, a reçu le nom de Tau (τ).

Des nombreux travaux ont permis par la suite de préciser ses propriétés,

masse, vie moyenne, taux de désintégration etc. Il en existe deux de charge électrique opposée ainsi que le neutrino et l'antineutrino qui leurs sont attachés. Quant à la masse de ces neutrinos, elle est probablement nulle et de toute façon inférieure à 250 MeV.

On trouvera en réf.503e une liste des travaux plus récents sur ce nouveau lepton.

Quant à l'existence d'autres leptons plus lourds que le Tau, il semble qu'il n'en existe pas ayant une masse inférieure à 18 GeV⁽⁵¹⁴⁾.

XVI. ENCORE UNE NOUVELLE CLASSE DE PARTICULES, LES PARTICULES UPSILON(τ) ET LES QUARKS DE BEAUTE(b) ET DE FIDELITE OU DE VERITE (t)

Après dix ans d'efforts ininterrompus la physique des particules vient de s'enrichir d'une nouvelle famille de bosons douée d'un nouveau nombre quantique appelé beauté, porté par un nouveau quark b (bottom ou beauty), et cela par suite de circonstances assez particulières, puisque c'est tout autre chose que l'on cherchait⁽⁵¹⁵⁾.

En effet l'histoire débute à 1967 époque à laquelle L. Lederman cherchait les leptons lourds auprès du synchrotron de Brookhaven (protons de 30 GeV). On pensait à cette époque qu'une collision proton-nucléon pouvait conduire à un état fortement excité qui, par désintégration, émettrait principalement des particules à interaction forte, hadrons (pions, kaons,...), mais aussi, plus rarement, un photon virtuel qui se matérialiserait immédiatement en une paire de leptons L^+L^- , suivant le processus (fig.106).

$$p + \text{Nucléon} \rightarrow \text{photon} + L^+ + L^- + \text{autres particules}$$

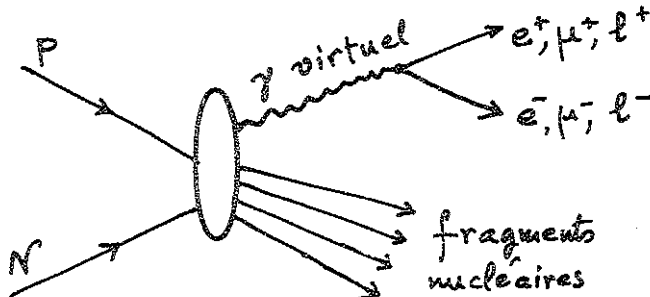


Fig.106

Et c'est ce nouveau lepton L (le lepton tau dont on vient de parler) que l'on cherchait par les paires des leptons connus de sa désintégration. En effet, la détermination des angles et des énergies de ces leptons permettent de remonter à la masse du photon virtuel, mais, contrairement à toute attente, au lieu de décroître linéairement, la distribution de cette masse présentait une accumulation d'événements autour de 3-4 GeV, accumulation qui persistait quand on faisait varier l'énergie des protons incidents de 22 à 29,5 GeV. Il ne s'agissait donc pas d'un effet fortuit. Bon signe, pour lequel les théoriciens ont manifesté un grand intérêt et qui a incité le groupe de Lederman à se transporter à Batavia pour une expérience plus élaborée auprès de l'accélérateur du FERMILAB qui donnait des protons d'une énergie dix fois plus grande (300 GeV).

La cueillette des données a commencé en 1974, juste avant la "révolution de Novembre", comme on a appelé la découverte des particules psi, et qui expliquait parfaitement l'accumulation à 3-4 GeV. La chose était claire : à Brookhaven on était passé à côté de la découverte au psi, faute d'avoir une bonne résolution en masse et malgré le nombre considérable de paires de muons traités ($\sim 10\ 000$, tandis que Ting ne disposait que de 242)!

De 1975-1976 la nouvelle version a procuré plusieurs centaines de paires de muons, dont plus de 350 avec une masse supérieure à 5 GeV.

Entre temps l'énergie de l'accélérateur avait atteint 400 GeV et le traitement des données a permis à J. Yoh de remarquer une nouvelle accumulation vers 9,5 GeV (fig. 107). C'était un nouvel encouragement mais il a encore fallu modifier le système de détection, se transporter plus près de la cible, changer l'absorbeur pour éliminer les événements parasites et ajouter un aimant défecteur pour éloigner les particules indésirables. De cette façon en 1977 on détectait presque 100 fois plus d'événements qu'auparavant ; rien qu'en une semaine les physiciens disposaient de ~ 3000 paires de muons d'une masse supérieure à 5 GeV, soit dix fois plus que tous les autres laboratoires ensemble.

Voici maintenant comment Lederman a rapporté la situation ⁽⁵¹⁵⁾ :
Our excitement rose to a high pitch when we saw that the steady decrease

of the yield of muon pairs, as they became more massive, was interrupted near 10 GeV by an intriguing bump.

The following week we doubled our data and still the bump remained... We looked separately at each square centimeter of the detector's surface to see how the muons that struck each area were distributed. Every where we find smooth distributions, indicating that the apparatus had not generated the resonance... as the apparatus passed other tests and as we accumulated more data we became convinced that the resonance represented something real, a new particle of mass of 10 GeV. Although we wanted to keep our results secret until we could fully interpret them, rumors of our discovery spread rapidly throughout the physics community. Therefore on June 20 we made our data public : 26000 pairs, almost 100 times the data of all previous experiments combined.

We named the particle ψ ...

After we gathered more data we found that the resonance consisted of two closely spaced peaks (with a suggestion of a third) 600 MeV apart and each 500 MeV wide. (fig.108) ⁽⁵¹⁶⁾.

Une étude plus approfondie a montré que la largeur de l' ψ était inférieure à 100 MeV, ce qui, d'après la quatrième relation l'incertitude de Heisenberg, correspond à une vie moyenne très longue, empêchant la particule de se désintégrer en hadrons plus légers.

Ces résultats furent rapidement confirmés par d'autres laboratoires et les physiciens de Hamburg donnent une largeur des ψ de 60 KeV. On se trouvait donc dans une situation analogue à celle des particules ψ , c'est-à-dire à l'obligation de faire intervenir un nouveau quark de saveur différente de u,d,s et c que l'on a appelé beauté ; c'est le quark b (bottom ou beauty), qui avec le quark t (top, truth ou fidélité) doit former un doublet $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ ⁽⁵¹⁷⁾. Les états ψ seraient donc des états du bottonium formés de deux quarks $b\bar{b}$. Ces deux nouveaux quarks doivent avoir des masses plus grandes que le quark c, le t, étant le plus lourd de tous, ne se manifeste d'ailleurs dans aucune expérience du moins pour le moment.

Le bottonium présente un spectre plus riche que le charmonium et on n'est est qu'au début de l'exploitation de ce spectre.

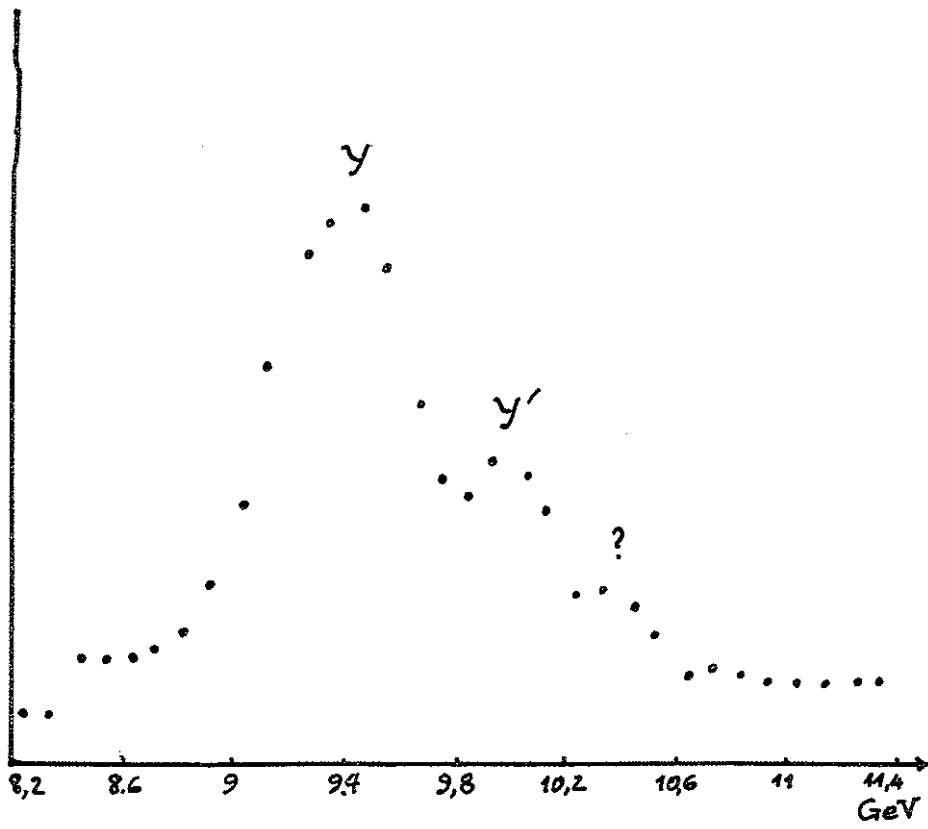


Figure 107

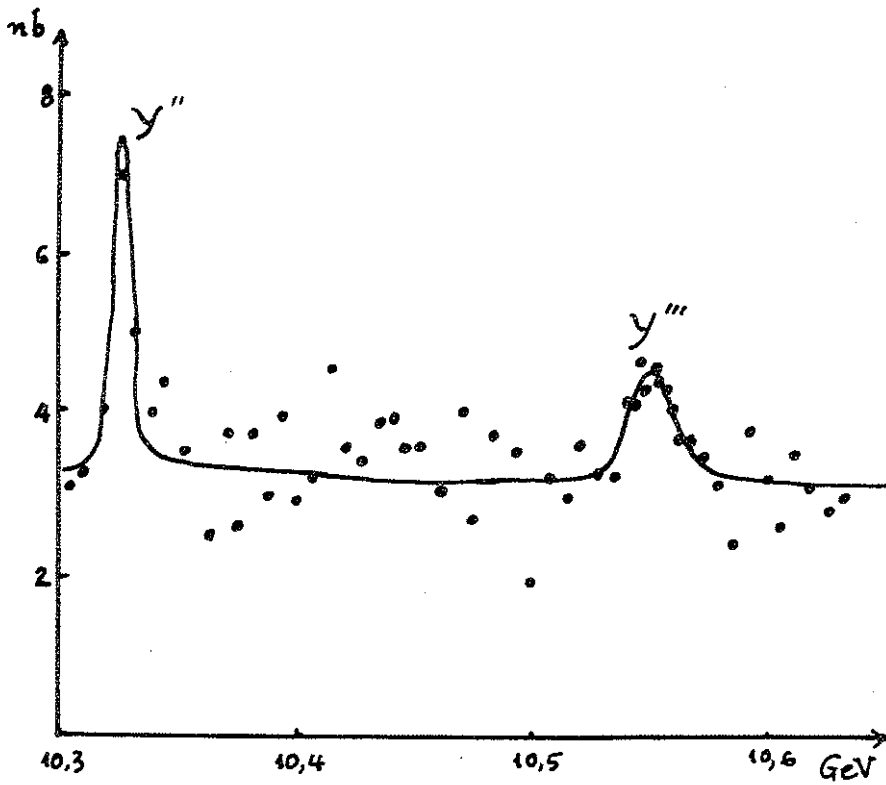


Figure 108

Les upsilons seraient donc des particules à beauté cachée, comme les psi sont des particules à charme caché et on s'attendrait à l'existence de bosons à beauté nue contenant un b ou un \bar{b} avec un des autres quarks (anti-quarks) connus que l'on désigne par B ou \bar{B} .

Le quark t doit d'ailleurs se comporter d'une manière analogue et former des états de toponium $t\bar{t}$ à spectre encore plus riche en états. On a donc réunis dans un vocable commun Quarkonium les différents états des quarks lourds (charmonium, bottonium et toponium) ^(507d). C'est la quatrième spectroscopie des quarkonia.*

On comprend alors la grande excitation des physiciens à l'annonce d'une quatrième particule upsilon d'une largeur d'environ 20 MeV, donc très grande par rapport aux trois autres (fig.108) ⁽⁵¹⁸⁾.

Ainsi on connaît actuellement quatre particules upsilon :

Υ (9460 MeV)
 Υ' (9993 ")
 Υ'' (10322 ")
 Υ''' (10547 ")

que l'on identifie aux quatre états 3S_1 du bottonium. On pense d'ailleurs que le quatrième upsilon, bien plus large que les autres, est juste au dessus du seuil de désintégration en $B\bar{B}$, c'est-à-dire en une paire de bosons à beauté nue, ce qui place entre 5,16 et 5,23 GeV la masse de ces bosons. Ce qui n'est pas pour déplaire aux théoriciens ⁽⁵¹⁹⁾.

L'existence de mésons B ou \bar{B} serait la preuve directe de la beauté; mais ces deux mésons sont difficiles à détecter, ayant une vie moyenne très courte pour donner une trace mesurable dans une émulsion photographique par exemple, sauf dans le cas où ils se désintégreraient par voie faible avec changement de saveur.

Or d'après les récents résultats de Cornell il semble que l'on détecte des électrons d'une énergie plus grande que 1 GeV dans des collisions e^+e^- au voisinage de 10,5 GeV dans le centre de masse, électrons que seule la désintégration d'un B peut produire (les hadrons plus légers ne peuvent pas

donner d'électrons de cette énergie)⁽⁵²⁰⁾. Les études en cours vont rapidement préciser la situation, qui pour le moment semble assez fluide.

Voici donc la nouvelle table des quarks :

Table XIV. Propriétés des quarks

Nb. Quantiques	d	u	s	c	b	t
Nb. baryonique B	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Charge électrique Q	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Isospin I ₃	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Etrangeté S	0	0	-1	0	0	0
Charme C	0	0	0	+1	0	0
Beauté B	0	0	0	0	+1	0
Vérité T	0	0	0	0	0	+1

Pour mettre en évidence le parallélisme leptons-quarks, on les classe en trois familles comme suit :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \\ e^- \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \text{famille de la première génération}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \\ \mu^- \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \text{famille de la deuxième génération}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \\ \tau^- \end{pmatrix} ; \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \text{famille de la troisième génération}$$

Comme chaque saveur des quarks se présente sous trois couleurs, on a donc $18 + 6 = 24$ particules et autant d'antiparticules, que l'on croit être des objets ponctuels ou quasiponctuels, sous la réserve que les quarks ne comportent pas des constituants plus fondamentaux (préons...).

Notons encore que les théoriciens sont à même de donner des ordres de grandeur des masses des quarks et des relations entre ces masses⁽⁵²¹⁾ :

$$u=4,2 \quad ; \quad d=7,5 \quad ; \quad s=150 \quad ; \quad c=1200 \quad ; \\ b=4600 \quad ; \quad t=18000 \text{ MeV}$$

$$\begin{array}{ccc} m_e & m_d & m_u \\ m_\mu & m_s & m_c \\ m_\tau & m_b & m_t \end{array} = 0$$

Une question importante n'a pas encore trouvé de réponse : la liste des leptons séquentiels est-elle close ou non ? A priori, il n'y a pas de raison péremptoire à ce que la séquence s'arrête avec le lepton Tau, mais il n'y a aucune indication sur l'ordre de grandeur des masses et le nombre des leptons suivants qui en principe doivent être plus lourds que le Tau. L'expérience seule pourra apporter une réponse. Dans le cas affirmatif ce sera donc aux théoriciens d'inventer de nouveaux quarks si la notion de famille a conserver son sens.

ET MAINTENANT... ?

...toutefois je me sentais captif d'une pensée. Mes souvenirs l'alimentaient d'exemples, qu'elle essayait de tourner à son avantage. Je lui présentais mille choses, car je n'étais pas encore, en ce temps-là, si expert dans l'art de réfléchir et de me leurrer, que je pressentisse ce qu'il fallait et ce qu'il ne fallait pas exiger d'une vérité trop jeune encore et trop délicate pour supporter toutes les rigueurs d'un interrogatoire...

P. VALERY

Nous voilà arrivés à la fin de notre parcours à travers les couloirs de l'espace-temps et de la Physique des Particules. La récolte a été abondante en objets divers, leptons, quarks, bosons, baryons etc. sans oublier l'indispensable photons et les Weakons de Weinberg (528) (W^+, Z^0) ni les nombreuses particules de jauge dont on ignore tout. On pensait tout expliquer puisque la Science explique tout ! On complètera par un "tout sauf l'essentiel".

Partis des premières spéculations de Thalès qui voulait tout dériver de l'Eau, et en passant par toute une suite de spéculateurs grecs, nous avons rencontré Platon tentant une explication, mieux une représentation mathématique du monde sensible, à l'aide de triangles rectangles constituants des polyèdres réguliers, d'une symétrie géométrique admirable, si l'on tient compte de l'état des mathématiques à son époque. Ignorant le langage de la théorie des groupes et de l'invariance de jauge globale ou locale, Platon avait explicité dans le langage quotidien toutes les opérations de symétrie de ses triangles et de ses polyèdres ;

il en était certainement très fier mais il nous a laissé une porte ouverte par cette phrase à la mesure de sa modestie : "si quelqu'un peut nous proposer un meilleur choix (pour la constitution des 4 polyèdres), ce sera un ami dont l'opinion prévaudra et pas un adversaire" (Tim. 54 a 4).

Cet ami viendra vingt-quatre siècles plus tard ! C'est celui dont le nom figure au titre de cet exposé.

Entre temps les quatre corps platoniciens ont connu bien des vicissitudes jusqu'au début du XIX^e siècle. Le Feu s'est vu transformé en calorique, fluide impondérable dont les particules sont capables de traverser le verre (Boyle) ; il a traversé tout le XVIII^e siècle sous le nom de phlogistique jusqu'à Lavoisier, pour finir comme une des multiples formes de l'énergie au milieu du XIX^e siècle.

L'Air, l'Eau et la Terre ont connu une fortune analogue, et malgré la ruine de la théorie des quatre éléments, ils inspirent encore de nos jours peintres et poètes.

Les nouvelles particules élémentaires, les atomes, font leur apparition au tout début du XIX^e siècle avec Dalton ; peu nombreux au début ils finiront par dépasser la centaine de nos jours, mais ils seront fortement contestés jusqu'à l'aube de notre siècle, où l'expérience vint confirmer leur existence.

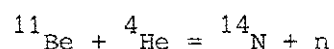
Une ironie du hasard veut d'ailleurs que juste au moment où l'existence des atomes vient de s'établir, Rutherford va les réduire en miettes.

Les seules particules élémentaires jusqu'à 1930 sont les protons et les électrons, le photon ayant un statut particulier.

Quelle belle époque, où l'on peut tout expliquer par des protons et des électrons depuis l'atome d'hydrogène jusqu'à l'uranium ! Quelques difficultés subsistaient, nous l'avons vu, surtout après la naissance de la Mécanique Quantique, mais cela n'inquiétait pas les

physiciens ni les chimistes outre mesure ; on ne connaissait que deux particules et il fallait bien vivre avec. Il est vrai que juste en 1930 Pauli avait jeté un gros pavé dans la mare avec son minuscule neutrino qui ne dérangeait pas beaucoup les esprits, tellement il était insaisissable et problématique.

Deux ans plus tard (1932) Chadwick, en appliquant les relations de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement à la réaction :



découvre le neutron et Heisenberg constitue une théorie du noyau contenant uniquement des protons et des neutrons ; les électrons sont rejetés bien loin, là où Bohr les avait placés dans son modèle de l'atome en 1913.

Tout semble vouloir se simplifier à l'extrême, mais les neutrons sont des particules qui font beaucoup de dégâts sur leur passage, et avec la découverte de la radioactivité artificielle (1934) un immense champ d'expérimentation s'ouvre pour la Physique Nucléaire avec les résultats que l'on sait.

Mais en même temps de nouveaux problèmes théoriques surgissent pour la compréhension de la stabilité de la matière. C'est alors que Yukawa propose sa théorie (1935) qui fait intervenir le pion, dont on a vu les propriétés. C'est un comble, d'autant plus qu'Anderson avait déjà découvert le positron (1932) dans le rayonnement cosmique !

Il y a encore dans la Nature des choses à découvrir ! Mais comment faire avec ces petits accélérateurs de protons ou de deutons ?

Quelques sportifs (on les appelait les cosmiciens) pensent alors à utiliser ce mystérieux rayonnement cosmique, oh, certes pas pour regarder le proton, mais parce que par sa nature il posait pas mal de problèmes ; dans l'espoir aussi d'y trouver des choses nouvelles, comme Anderson qui y avait trouvé le positron ; la particule de Yukawa peut-être ! On y trouva effectivement le muon, qui posait plus de problèmes qu'il n'en résolvait.

Comme il n'y avait pas assez de distractions pour les physiciens perchés sur les plus hauts sommets des montagnes et ceux qui passaient leurs nuits aux caves des cyclotrons (question de vie moyenne des radio-éléments), le ciel les a précipités dans le trou noir de la guerre, à peu près comme Prométhée.

Triste époque pendant laquelle les physiciens américains, et ceux des européens qui avaient traversé à temps l'Atlantique, s'engagent à des travaux de titans avec une détermination hors du commun. Bref, du du jamais vu !

Ils ont dérobé le Feu au Ciel. Quelle boîte de Pandore !

Nous avons relaté dans la deuxième partie de cet exposé comment les choses se sont passées depuis 1945, le rôle de tout premier plan joué par le rayonnement cosmique en tant que mine de particules nouvelles, pions, kaons, hypérons, livrés au compte-gouttes, la montée spectaculaire des accélérateurs, les spéculations hardies des théoriciens, la naissance de la branche de Physique des Particules ou de Haute Energie, qui devient de nos jours la Physique des Très Grandes Energies du TéraVolt.

Des particules, vers les années 60, il y en avait à la pelle ; beaucoup plus que d'éléments chimiques dans le tableau de Mendéléév dûment rempli (et encore ouvert) depuis 1939. Et que dire des particules cachées derrière les équations des théoriciens (les bosons intermédiaires, que Weinberg a baptisé Weakons ⁽⁵²⁸⁾, les gluons, les particules de jauge dont la masse peut atteindre des TeV etc).

Toutes ces particules sont-elles élémentaires ? Y en a-t-il qui soient plus élémentaires que d'autres ? Et celles qu'on découvre au fur et à mesure seront-elles aussi élémentaires ? Et, en fin de compte, que signifie le vocable particule élémentaire ?

Faudra-t-il changer notre vocabulaire ou la manière de voir les choses ?

Puis Gell-Mann est venu, la tête remplie de quarks (de J. Joyce), trois au début qu'il a ensuite peints en trois couleurs chacun, pour faire plaisir à Pauli, tout en nous rassurant qu'on ne les verrait jamais. Et si on les voit, malheur aux théories de confinement. On croit en voir cinq actuellement (u,d,s,c,b) si l'on regarde avec un

microscope de grandissement 10^{16} et avec un peu de chance on apercevrait un sixième (t).

Toutes les particules dont nous avons fait la fiche d'état civil seraient, pense-t-on généralement, constituées de quarks et d'antiquarks colorés, mais on ne voit que celles qui sont incolores ou singulets de couleur pour utiliser un langage plus pertinent. Quant à ceux que l'on appelle leptons (e, μ , τ avec leurs neutrinos et leurs antiparticules), avec le même microscope ils sont aussi ponctuels que les quarks. En anticipant sur le quark t on les a alors groupés en trois familles dont SU(5) par exemple assure les filiations.

Tout compte fait on arrive ainsi à un ensemble de 48 particules, toutes ponctuelles ou presque avec notre grandissement. N'est-ce-pas encore beaucoup pour qu'elles soient toutes élémentaires ? Et qu'arriverait-il s'il on passait au grandissement 10^{20} ou 10^{30} ? Et si les quarks et les leptons étaient composites, jusqu'où irait cette régression ? à l'infinie ou bien faudrait-il "s'arrêter quelque part" (Aristote) ?

Nous ne prétendons pas donner des réponses à des questions aussi difficiles et aussi discutables. Nous nous contenterons de prendre le pouls des théoriciens qui sont plus hardis dans le genre.

Commençons par Weinberg, le protagoniste de la théorie électro-faible^(522 a 4) :

Les entités fondamentales sont des champs des quarks et des gluons qui ne correspondent pas à des particules observables, même en principe, tandis que les particules à interaction forte observées ne sont pas du tout élémentaires, mais sont les simples conséquences d'une théorie quantique des champs sous-jacente.

Pour H. Fritzsch⁽⁵³²⁾ :

Seuls les bosons sans masse (le photon et les gluons) sont élémentaires; à des distances de l'ordre de 10^{-17} cm leptons, quarks et bosons intermédiaires sont composites ; les fermions sont composés de haplons (simples).

V.F.Weiskopf commente ainsi la situation inconfortable actuelle⁽⁵²⁹⁾ :
Although the past decade has given us many more insights into the world of Particles, some of the great questions are still open. We do not even know wheter QCD (Quantum Chromodynamics) make sence at low momentum transfer. There is the question of the origin of the masses of the higher quarks, the question of the nature of quark flavors and of heavy electrons (is there a limit or is there an internal structure ?), the question of the unification of electroweak and strong forces and the question of the uniqueness of the electric charge e , all of which are still completely unexplained. The fractional charges of the quarks make the last problem even more mysterious.

Qui plus est certaines théories prédisent un grand désert entre les énergies actuellement disponibles et quelques centaines de GeV, ce qui condamnerait les expérimentateurs à cette 'bread and butter physics", comme disent les américains ! Mais, comme le disait Einstein⁽⁵³⁰⁾ : La pensée purement logique ne peut pas nous procurer une connaissance du monde empirique ; toute connaissance de la réalité commence par l'expérience et finit avec elle.

En conclusion, les expérimentateurs doivent mettre les bouchées doubles pour rattraper les théoriciens. Un effort considérable est donc fait pour la construction d'accélérateurs plus puissants. Rien que pour les anneaux de collision e^+e^- de 1965 à nos jours la croissance en énergie est multipliée par 10 tous les 12 ans, une allure qui semble vouloir continuer jusqu'à la fin de ce siècle. Déjà le SPS (Super Proton Synchrotron) du CERN, converti en collisionneur $p\bar{p}$ peut atteindre $2 \times 270 = 540$ GeV et d'autres projets sont en cours d'exécution.

- Le LEP (Large electron-positron collider) du CERN pourra atteindre dans quelques années $2 \times 125 = 250$ GeV.
- HERA à Hamburg avec e^- de 30 GeV contre p de 300 GeV.
- Le TEVATRON du FNAL donnera des protons de 1 TeV et par la suite des collisions $p\bar{p}$ à $2 \times 1 = 2$ TeV.
- UNK à Serpukhov fournira des protons de 3 TeV etc, etc...

Tout dernièrement R. Wilson a donné la description d'un synchrotron pouvant accélérer des protons jusqu'à 20 TeV. Ce sera le plus grand accélérateur jamais construit (40 km de rayon), mais Wilson est très optimiste : Lorsque nous serons prêts pour un tel accélérateur, oui, nous pourrons le construire, affirme-t-il⁽⁵³¹⁾.

Il est cependant clair que même après l'an 2000 nous serons encore bien loin des énergies de $\sim 10^{15}$ GeV requises par la grande unification ou des 10^{19} GeV de la supergravitation.

D'ici là les expérimentateurs ne vont pas rester inactifs. Avec les énergies actuellement disponibles le champ d'investigation n'est nullement limité; un champ d'investigation immense se découvre et on peut parier que le siècle qui s'achève restera dans les annales le siècle des grandes découvertes et des profonds bouleversements de nos idées sur la structure de la matière et l'approfondissement de nos connaissances de cette immense variété des phénomènes que la nature offre à nos sens et à notre esprit.

La physique du neutrino, celles des collisions e^+e^- , l'approfondissement des découvertes récentes, dont nous avons fait état, la physique des particules à charme et à beauté sont loin d'être terminées. Déjà les gluons font leur timide manifestation dans quelques expériences et d'autres problèmes vont certainement surgir des expériences en cours.

D'autre part certains aspects des théories unifiées peuvent être testés aux énergies actuelles.

La recherche des quarks physiques ne cesse de se poursuivre malgré les nombreuses recherches négatives du présent et personne ne peut préjuger de l'avenir, mais on imagine facilement le choc que provoquerait leur éventuelle découverte. Une chose est certaine dans une telle éventualité : bien des théories du confinement seront à mettre au panier.

Les bosons intermédiaires ne sont pas en dehors des possibilités des accélérateurs actuels et "malheur à la théorie si on ne les trouve pas" (Weiskopf)⁽⁵²⁹⁾.

La non-conservation des nombres baryonique et leptonique que la théorie implique entraîne l'instabilité du nucléon et des oscillations neutrino. Il y a bientôt dix ans que Pati et Salam^(522g) prophétisaient l'instabilité du proton^{*}; des nombreuses expériences en cours cherchent à mettre en évidence cette instabilité et les premiers résultats, insuffisants encore, donnent une limite de $\sim 10^{30}$ a pour la vie moyenne du proton⁽⁵²⁶⁾, ou 7.10^{30} pour celle du nucléon lié dans le noyau⁽⁵²⁷⁾.

On conçoit facilement l'énormité des difficultés de telles expériences qui mettent en jeu des kilotonnes de matière dans laquelle il faut détecter quelques désintégrations par an.

On trouvera en réf.522 a une description des différentes expériences actuellement en cours ou en projet et des difficultés qu'elles comportent ; elles sont pourtant indispensables vu l'importance de l'enjeu non seulement pour les théories de la physique, mais aussi pour la cosmogonie.* *

Une telle désintégration est concevable suivant plusieurs mécanismes dont celui de la figure 109 semble avoir une bonne probabilité :

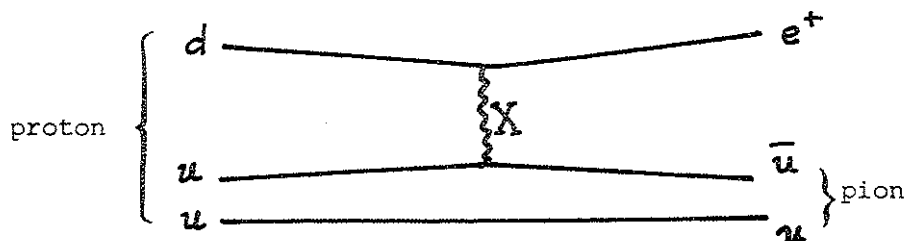


Figure 109

Le quark d rouge du proton en s'approchant du quark u vert à 10^{-30} cm, par exemple, émet une particule X et se transforme en positron, pendant que la particule X est absorbée par le quark u qui se transforme en antiquark \bar{u} magenta ; finalement la paire $u\bar{u}$ forme un pion neutre.

La particule X ayant une masse de l'ordre de 10^{14} GeV, il n'y a pas d'espoir de la voir, mais c'est précisément sa masse qui détermine la vie moyenne de cette transmutation un peu particulière. Or le pion neutre se désintègre très vite en deux photons, le positron rencontre un électron

et s'annihile en deux photons aussi ; on se retrouve donc finalement avec un proton de moins et 4 photons d'une énergie totale de 1 GeV.

Quel réacteur nucléaire magnifique !

Nous venons de dire que la particule X est insaisissable, mais d'après les théoriciens il n'est pas inconcevable que 10^{-40} s après l'explosion "de l'atome primitif" (si la théorie du big-bang est vraie) toutes les particules avaient des énergies équivalentes à la masse de X et on ne pouvait pratiquement pas faire de distinction entre leptons et quarks. Il n'y avait qu'une soupe primitive de matière uniforme. Puis il y a eu différenciation en matière et antimatière en quantités égales (univers symétrique). Un tel univers, s'il obéissait à nos lois, évidemment s'annihilerait aussitôt formé, tandis que le notre semble être constitué de matière (jusqu'à nouvel ordre). Mais si le nombre baryonique n'était pas conservé ?

Si la symétrie primitive était brisée ne serait-ce que pendant un intervalle de temps très court, il se serait créé plus de quarks que d'antiquarks et le problème

En terminant ces lignes dont le lecteur est prié d'excuser la longueur et les incertitudes, il me vient à l'esprit quelques vers que je livre à la "cogitation" des intéressés:

Pitié pour qui nous combattons
Aux frontières de l'illimité et de l'Avenir,
Pitié pour nos erreurs,
Pitié pour nos péchés.

G. APOLLINAIRE

NOTES

(Repérées par des astérisques dans le texte)

Page 23

- * La constitution de l'Ame de l'Univers fait intervenir trois constituants abstraits que l'on peut interpréter, dans le cadre des idées pythagoriciennes, en les identifiant avec les trois nombres 1, 2 et 3. Un serait l'élément d'identité, principe et origine de tous les nombres, deux le principe de différenciation (altérité ou dualité) et trois l'élément intermédiaire participant de la nature de deux premiers et obtenu par leur conjugaison (addition). Une fois ce difficile mélange réalisé le créateur procède à son partage en 7 portions, constituant à partir de l'unité deux progressions géométriques de rapport 2 et 3. Entre les termes consécutifs de ces suites Platon va faire apparaître, sans autre explication, les rapports musicaux de quinte ($3/2$), tierce ($4/3$), ton ($9/8$) et demi-ton ou défaut ($256/243$), à l'aide desquels il constuit une échelle musicale, allant de 1 à 27.
- Cela est possible par interpolation entre deux termes consécutifs du moyen harmonique et du moyen arithmétique. Les nombreuses interprétations données à ce passage sont contradictoires. La solution la plus rationnelle serait de partager de cette façon l'intervalle 1-3 et de répéter cette construction trois fois, ce qui conduit à une suite comportant 3 fois 8 tons et 3 demi-tons dans l'ordre $t, t, t/2, t, t, t, t/2, t, t, t/2, t$, soit 24 tons et 9 demi-tons, ou 4 octaves, une quinte et un ton ($27=16 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{9}{8}$). Cette échelle répétée deux fois couvre l'intervalle de 1 à 54 (le Tout).

Page 28

- * La constitution de la matière fait intervenir deux triangles (éléments) dont le rectangle et isocèle sert à la construction du cube et le scalène à celle des autres polyèdres réguliers (à l'exception du dodécaèdre). La construction effectuée par Platon est lourde de

conséquences, car elle fait intervenir bien avant l'heure des considérations très importantes sur les symétries. Ce fait a été reconnu pour la première fois par W. Heisenberg. Platon génère le triangle équilatéral par trois rotations consécutives de $2\pi/3$ de la figure obtenue par accollement suivant les hypoténuses de deux triangles rectangles scalènes qui sont des opérations du groupe symétrique d'ordre 3 ; la construction fait immédiatement ressortir les opérations de réflexion. Le triangle équilatéral ainsi construit porte alors toutes les traces des éléments de symétrie des polyèdres réguliers.

On peut dénombrer les opérations de symétrie qui ramène chaque polyèdre à sa position initiale ; il y en a :

1+3+8=12 rotations pour le tétraèdre,
12+12=24 " " l'octaèdre et
1+15+20+24=60 rotations pour l'icosaèdre.

Le nombre des triangles élémentaires contenus dans chaque polyèdre est le double du nombre des opérations, soit 24, 48 et 120 respectivement. Ce fait est remarquable et on peut se demander si Platon en était parfaitement conscient, car il relève de la théorie des groupes finis de symétrie.

Platon semble hésiter devant le dodécaèdre. En effet ce polyèdre d'invention récente possède des faces pentagonales ne pouvant pas être générées à partir de deux triangles élémentaires postulés au départ ; ses côtés sont irrationnels et se décomposent en triangles isocèles mais non-rectangles. Platon passe outre, ne voulant pas faire intervenir un triangle de plus !! Il réserve le dodécaèdre pour la construction de l'Univers ; en effet c'est le seul des cinq polyèdres dont le volume se rapproche le plus de celui de la sphère.

On sait que, contrairement aux polygones réguliers dont il existe une infinité, il n'y a que cinq polyèdres réguliers. La démonstration de ce théorème a été donnée par Euclide (Elément XII, Prop. 18). D'après Descartes—Euler les nombres des sommet(s), des faces (f) et des arêtes (a) satisfont à la relation :

$$\underline{s} + \underline{f} = \underline{a} + 2$$

Si \underline{m} est le nombre des arêtes aboutissant à chaque sommet et \underline{n} le nombre des côtés de chaque face, on a aussi :

$$\underline{m} \cdot \underline{s} = \underline{n} \cdot \underline{f} = 2a$$

d'où $1/\underline{m} + 1/\underline{n} = 1/\underline{a} + 1/2$

qui, avec $\underline{m} = 3, 4, 5$; $\underline{n} = 3, 4, 5$ et $\underline{a} = 6, 12, 20$, donne les cinq solutions désirées. L. Schläfli avait introduit pour les polyèdres une nouvelle notation mettant en évidence le nombre \underline{n} des côtés de chaque face et le nombre \underline{m} des faces par sommet $\left. \begin{matrix} \underline{n} \\ \underline{m} \end{matrix} \right\}$.

A. Dürer (Des Proportions) a montré comment on peut construire ces polyèdres en les développant sur le plan de l'une des faces et en repliant le dessin ainsi obtenu jusqu'à fermeture complète de la figure.

Des considérations analogues sur les "formes primitives" rassemblées sous forme de polyèdres (parallélépipède, tétraèdre, prisme hexagonal et dodécaèdres) ont été développées vers la fin du XVIII^e siècle par Haüy et plus tard par Ampère (molécules) et M.A. Gaudin (L'Architecture du monde des Atomes, Paris 1873). A l'heure actuelle les considérations de symétrie sont au centre des préoccupations des théoriciens de la physique des particules élémentaires.

Page 31

- * Par un effort admirable, à 24 siècles de nous, Platon entend donner une explication de toutes les propriétés physicochimiques de la matière à partir des propriétés géométriques des polyèdres représentatifs. Il y a une grande variété de Terres, Eaux, Airs et Feux suivant la grandeur des triangles élémentaires dont ils sont générés. Ces triangles eux mêmes sont construits à partir d'un triangle invisible par abaissement de la perpendiculaire sur l'hypoténuse issue du sommet de l'angle droit, qui partage le triangle primitif en deux triangles semblables entre eux et au triangle initial ; et cette construction peut se poursuivre indéfiniment. Il est tout aussi clair, d'après le texte, que l'on peut développer toute une chimie quantitative ; ainsi, en adoptant l'initiale de chaque corps comme symbole, on peut écrire en suivant le texte :

$$F + F = A$$

$$2,5A = E$$

$$E = 2A + F = 5F \dots$$

Seule la Terre, faite de triangles rectangles équilatéraux n'est pas susceptible de se transformer en un autre polyèdre régulier fait à partir de triangles scalènes.

Il est d'autre part clair que ces transformations obéissent à des lois quantitatives discrètes (discontinues), à la seule condition de satisfaire à la conservation de la surface, qui remplace en quelque sorte la loi de conservation de la masse de Lavoisier.

Quant au contenu des polyèdres, la plupart des interprètes, de Platon s'accordent à reconnaître qu'ils sont vides; il y a là, pensons-nous une interprétation erronée des idées platoniciennes sur la structure de la matière. Comme W. Heisenberg (réf. 5c, p.75) l'a exprimé, "les particules élémentaires dans le Timée de Platon sont finalement non de la substance, mais des formes mathématiques". Ce point de vue est d'ailleurs en parfaite concordance avec l'ensemble de la philosophie platonicienne, puisque la matière ne possède qu'une existence accidentelle ; elle n'est pas une Etre réellement étant (ontos on) ; elle n'existe que par participation à la Forme qui lui confère ses propriétés. Que nous reste-t-il, disait Kepler, que de dire, avec Platon, que Dieu est toujours géomètre !

Tout récemment Heisenberg (Am.J.Phys.43,389,1975), à la question : par quoi doit-on remplacer le concept de particule fondamentale qui peu à peu a complètement perdu son sens, donne la réponse suivante : "Je pense que l'on doit remplacer ce concept par celui d'une symétrie fondamentale... Mais ceci est encore un sujet qui devrait être décidé par les expériences. Je voulais seulement dire que ce que l'on doit chercher ce ne sont pas des particules fondamentales, mais des symétries fondamentales".

La réponse platonicienne est-elle profondément différente de ce point de vue ?

Page 31

- * * L'éther aristotélicien n'entre pas dans la composition du monde sublunaire (terrestre) qui ne comporte que les 4 éléments d'Empédocle et de Platon. Il y a toutefois une différence essentielle entre la théorie de la matière de Platon et celle d'Aristote ; pour ce dernier tous les éléments (la Terre y comprise) peuvent se transformer

les uns en les autres, suivant le processus cyclique Feu→Air→Eau→Terre→Feu, à ceci près que la transformation entre deux éléments non-consécutifs de la série est plus lente, car il faut nécessairement passer par tous les stades intermédiaires.

D'autre part il n'existe pas pour Aristote de matière primitive dont dérivent les éléments et aucun de ceux-ci ne peut être considéré comme placé au début de la chaîne des transformations, car de cette façon on arriverait à une régression à l'infini.

Quant aux corps naturels ce sont des mixtes contenant des proportions variables de chacun des éléments.

Page 51

- * La loi de Boyle-Matiotte ne semble être due ni à l'un ni à l'autre de ces savants ; Boyle lui-même (A Defence of the Doctrine Touching the Spring and the Weight of the Air (London, 1662) l'attribue à Richard Townley.

Page 52

- * Deux siècles plus tard, O. Lodge donnera (Nature, 75, 519 (1907)) pour la densité de l'éther la valeur 10^{12}g/cm^3 .
- * * L'idée de l'éther était si bien ancrée dans les esprits que H.A. Lorentz, dans sa conférence Nobel (1902) considérait que "le monde physique est composé de trois types de matériaux de base, la matière ordinaire, tangible et pondérable, les électrons et l'éther. Un atome est en dernier ressort une sorte de modification locale de l'éther omniprésent, une modification qui peut être déplacée d'un point à un autre sans que le milieu lui-même modifie sa position. En ce qui concerne sa constitution interne, dans l'état actuel de notre connaissance, il est difficile pour nous d'en donner une image adéquate."

De même J. Larmor (Aether and Matter, Camb. 1900) ne conçoit la matière que comme un agrégat d'atomes immergés dans l'éther.

En 1909 encore pour J.J. Thomson (The Electrician, 63, 776, 1909) "l'éther n'est pas une création imaginaire d'un philosophe spécula-

tif, mais il est aussi indispensable pour nous que l'air que nous respirons". Pour H. Poincaré enfin (Science et Méthode) "à part les électrons et l'éther rien n'existe".

C'est dire l'écho que la relativité restreinte avait trouvé chez les physiciens plusieurs années après sa formulation (1905).

Page 57

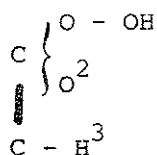
- * Traduction de la marquise du Châtelet.

Page 74

- * Cependant le chimiste russe M.V. Lomonosov (1742) suivi par le jésuite Boscovich (1711-1787), newtonien convaincu, considèrent la matière comme étant formée d'atomes ponctuels d'où émanent des forces attractives, suivant les lois de Newton pour les petites distances qui deviennent répulsives pour les distances plus grandes (Philosophiae naturalis theoria... Venise 1763, trad. anglaise par J.M. Child, Combr. Mar. 1966).

Page 75

- * Plusieurs autres propositions de représentation spatiale des molécules ont été faites par la suite par plusieurs chimistes : Döbereiner (1822), Dumas (1839), Kolbe et Frankland (1847), Williamson (1851), Couper (1858). Ce dernier est le premier à introduire la représentation de la valence par un trait, en écrivant p.ex. l'acide acétique sous la forme :



J. Loschmidt a élaboré (1861) une représentation géométrique plane pour de nombreux composés organiques dans laquelle chaque atome est représenté par un cercle dont le rayon est proportionnel à sa sphère d'influence. Même dans sa thèse à l'université d'Edinburgh,

A. Crum Brown développait des idées analogues, précisées en 1864 par

électrode de la double liaison (C=C) ; il utilisait une représentation très voisine de celle actuellement en usage en chimie organique.

De cette même époque datent aussi les différentes formules proposées pour le benzène par Kekulé (1865), Claus (1867), Dewar (1869), Bayer (1887) etc.

Le problème intéresse aussi Cayley et Sylvester du point de vue topologique (théorie des graphes), ce qui s'est révélé utile pour préciser les nombres des composés isomères.

- * * De même W.H. Wollaston (Phil.Trans. 98,96,1808) en supposant les atomes sphériques (hypothèse la plus simple), considère des arrangements géométriques en ligne droite (H-O-H), en triangle (NH₃) ou en tétraèdres réguliers, configurations qu'il applique aussi à la structure des cristaux.

En 1822, en revenant sur la théorie de Dalton, il essaye de démontrer l'existence effective des atomes par l'extension finie de l'atmosphère.

Page 77

- * Ann. de Chim., 90,43,1814. Lettre de M. Ampère à M. le comte Berthollet sur la détermination des proportions dans lesquelles les corps se combinent d'après le nombre et la disposition respective des molécules dont les parties intégrantes sont composées.
- * * M.A. Gaudin (Ann. de Chim. et de Phys. 52, 113,1833) avait reformulé l'hypothèse d'Avogadro-Ampère sous sa forme actuelle tout en faisant une parfaite distinction entre atomes et molécules et en donnant les bons poids atomiques d'un grand nombre d'éléments ; ses idées, favorablement accueillies par A.C. Becquerel et Berzelius ne sont pas sans avoir influencé Stan. Cannizzaro dans son rapport sur la réforme des poids atomiques basé sur l'hypothèse d'Avogadro qu'il présenta au premier congrès des chimistes tenu à Karlsruhe (1860).

Mendéléev y était présent et de cette époque que datent ses spéculations sur la classification périodique des éléments. A noter aussi les nouvelles idées d'Ampère sur la chaleur et la lumière (Ann. Chim. Phys. 58 432, 1835) qui considère des atomes comme des poids matériels dont émanent des forces attractives et répulsives, et les molécules en tant qu'assemblages d'atomes.

Clausius (Ann.d.Phys.100, 353, 1857) aussi avait proposé dès 1850 un critère sur la distinction entre atomes et molécules qui n'a pas eu plus de succès qu'Avogadro et Ampère. Son raisonnement était pourtant bien transparent :

Si dans les mêmes conditions de température et de pression, un volume d'oxygène se combine à un volume d'azote en donnant un volume d'oxyde, ce dernier doit contenir le même nombre de molécules que chacun des gaz constituants et la molécule d'oxyde est composée d'un atome d'oxygène et d'un atome d'azote.

Si un volume d'azote se combine à 2 volumes d'oxygène en donnant deux volumes d'oxyde (changement de volume dans un rapport 3/2), alors les molécules des gaz constituants contiennent deux atomes chacune (c'est à dire $N_2 + 2.O_2 = 2.NO_2$).

* * * Volta a présenté sa pile à l'Institut de France en 1800 ; elle a suscité de nombreuses discussions tant à l'Institut qu'à la Royal Society de Londres.

Page 78

* Dès 1824 il avait aussi préparé l'acide axalique.

Page 80

* Avec la dynamie (=1000 Kgm) comme unité de travail, une unité de chaleur correspond à 370 kgm ; R. Mayer donnait la valeur 365 kgm et Joule 425 kgm.

* * (Ann.d.Chem.u.Pharm.42,233,1842) où l'Unzerstörlichkeit est exprimée en ces termes : "Dans la chaîne des causes, comme il apparaît clairement d'après la nature de l'équation, un terme ou une partie d'un terme, ne peut jamais devenir égale à zéro. Cette première propriété des causes, on l'appelle l'indestructibilité".

* * * L'expression Erhaltung der Kraft de 1847, est remplacée par "Constanz der Energie" en 1880, mais déjà l'Equivalent en Force de la Chaleur, montre bien qu'il s'agit bien d'énergie ; c'est ainsi que Maxwell (Nature,16,389,1877) la comprenait en la qualifiant de "science producing doctrine". Même conclusion de Max Planck (Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Leipzig, 1913).

Page 81

* Après les premières spéculations des grecs (électrisation de l'ambre par frottement de Thalès) il faut attendre l'an 1600 pour que Gilbert constate que, à part l'ambre, une trentaine d'autres corps manifestent cette même propriété; un siècle plus tard, Dufay découvre que la cire d'Espagne frottée à la peau de chat acquiert une électrisation (résineuse), différente de celle du verre (vitreuse). Les appellations courantes d'électricité positive et négative ne sont introduites qu'en 1747, par Franklin qui distingue deux espèces de "electrical fire", considérées comme constituants de la matière. Cette théorie de deux fluides électriques a été modifiée par Aepinus, professeur à St. Petersburg, qui réduit les deux fluides à un seul, dont l'excès produit une charge positive et le défaut une charge négative ; la répulsion électrostatique est alors expliquée par une propriété de self-répulsion de la matière privée du fluide électrique. Pour Symmer (1759) la matière peut exister dans un état neutre si elle contient des quantités égales des deux fluides de charge opposée.

D'après Franklin le fluide électrique n'est pas continu et "electrical matter consists of particles extremely subtle, since it can permeate common matter, event the densest, with such freedom and ease as not to receive any appreciable resistance".

Mais même après la découverte des lois de l'électrolyse par Faraday (1833), la théorie des fluides électriques a encore les faveurs de lord Kelvin qui pense que le fluide électrique est l'électricité résineuse et non la vitreuse (Nature, 56, 84, 1897).

- * * J.J. Loschmidt (Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, 52, Abt. II, 395, 1865) donne une valeur de $2 \cdot 10^{18}$ pour le nombre des molécules par cm^3 (nombre de Loschmidt), calculé d'après la formule de Clausius du libre parcours moyen des molécules de l'air dont il estime le diamètre à $d = 10^{-7}$ cm.

Page 82

- * L'étude des rayons cathodiques n'a fait de réels progrès qu'à partir du moment où P. Lenard a pu les faire sortir du tube de Crookes en utilisant une fenêtre en quartz (il pensait en effet, comme E. Wiedeman, qu'il s'agissait d'une lumière ultraviolette); il n'a pu constater aucun effet de phosphorescence à l'extérieur du tube (1888). Hertz a utilisé des fenêtres métalliques minces (1892) avec succès et Lenard entreprit d'étudier leur absorption par la matière, afin de trancher entre un phénomène corpusculaire et un phénomène dans l'éther. Le résultat fut étonnant (Wied. Ann. Phys. 56, 1895) : seul le poids de la matière interposée entre en ligne de compte et non sa composition chimique. L'or absorbe plus que l'argent ou l'aluminium, mais à poids égal l'absorption est la même. La matière semblait donc consister d'un même matériau de base, dont elle contient des quantités différentes. Comme, dans le vide, les rayons cathodiques sont capables de parcourir des distances de plusieurs mètres, Lenard conclut qu'il ne s'agit pas de matière radiante, mais d'un phénomène dans l'éther. La déviation de ce rayonnement par le champs magnétique (déjà constatée par Hittorf et Goldstein) et par le champ électrique, l'amène à penser qu'il

s'agit plutôt de particules chargées négativement, dont il est en principe possible de déterminer la vitesse et la charge par unité de masse. Les premières mesures de Hertz et Schuster conduisaient à des résultats contradictoires, mais Lenard, en adoptant pour leur vitesse la valeur approximative trouvée par E. Wiechert (Nachtr.Kgl.Ges.Wiss.Göttingen,1898) estime le rapport (charge)/masse ~ 1000 fois celui de l'ion hydrogène dans l'électrolyse, de sorte que, si ces rayons étaient constitués d'atomes d'hydrogène, leur charge devrait être de 1000 fois supérieure à celle de l'ion électrolytique, ce qui paraissait impossible. "Il me semblait évident", conclut Lenard, "que j'avais découvert des parties encore inconnues de l'éther, représentant des charges électriques et se mouvant comme des masses inertes de 1:1000 de la masse de l'atome d'hydrogène, facilement identifiables au fluide électrique". Des expériences analogues étaient conduites en Angleterre par J.J. Thomson (Phil.Mag.44;1897). Comme Lenard l'a exprimé dans sa conférence Nobel "Nous avons devant nous ce que l'on ne croyait jamais pouvoir voir de l'électricité sans matière, des charges électriques sans corps chargés. Dans un certain sens nous avons découvert l'électricité elle-même".

Un autre fait capital pour le rôle qu'il a joué par la suite, et que Lenard a découvert, est la présence de forces électriques à l'intérieur de l'atome". Un bloc de 1m^3 de platine équivaut à un volume impénétrable par les rayons cathodiques de 1mm^3 ; une tête d'épingle dans un ciel vide". A ces constituants élémentaires de l'atome Lenard avait donné le nom de dynamides; lord Kelvin les appelait électrions, Lorentz et Zeeman électrons et J.J. Thomson corpuscules.

Page 83

- * De nombreux autres éléments ont été revendiqués, ilménium, davyum, lucium, nipponium, illinium, florentium, alabamine, russium et plus tard de séquanium.

Page 84

- * "Je considère comme une étape décisive", écrit-il dans ses Principes de Chimie, rédigés en 1869", dans le développement de mes idées sur la loi périodique, l'année 1860, celle du congrès des chimistes à Karlsruhe, auquel j'ai participé, et les idées exprimées à ce congrès par le chimiste italien . Cannizzaro. C'est lui que je tiens pour mon vrai précurseur, car les poids atomiques établis par lui m'ont donné le point d'appui indispensable".

- * * Mendéléév n'hasite pas de corriger les poids atomiques de 28 d'entre eux, étant convaincu que la grandeur du poids atomique d'un élément peut quelquefois être corrigé, si l'on connaît ses analogues.

- * * * Le gallium découvert par Lecoq de Boisbaudran(1875) et le scandium de Nilson (1879), trouvent leur place restée vide dans le tableau de Mendéléév.

Page 85

- * Il existe une abondante bibliographie sur l'historique du système périodique des éléments ; pour une première orientation citons entre autres :
 - D.I. Mendéléév, Les relations entre les Propriétés des Eléments et leurs Poids Atomiques, Zhurnal Ob'shchei Khimii 1, 60(1869) et Z.f. Chemie 5,405(1869).
 - " The Principles of Chemistry, London 1891 (l'édition russe date de 1869).
 - " Rev. Gén. Chmi.pure et Appl.I,211 (1899)
 - " " " " 3,533 (1901)
 - " Oeuvres Choisies,Léningrad 1934.
 - " Nouveaux matériaux de l'histoire de la découverte de la Loi périodique, Moscou 1950.

- B.N. Menshutkin, Nature 133, 946 (1934)

- E.G. Mazurs, Types of Graphic Representations of the Periodic System of the Elements, La Grange, Ill. 1957.
- C.A. Zapffe, Isis, 60, 461 (1969)
- J.W. Van Spronsen, J.Chem.Educ. 36, 565 (1959).
- " " " The Periodic System of the Elements (History of the first hundred years, Amsterdam-N.Y. 1969 .
- M.E. Wicks, Discovery of the Elements, Easton, Pa 1968.
- Atti del Congresso Mendeleeviano (1969), Torino 1971.
- M.A. El'Yashevich, Sov.Phys.USPEKHI 13, 1 (1970)

- * * Pour plus de détails sur le travail de Moseley on peut consulter J.L. Heilbron, Isis, 57, 336 (1966).

Page 88

- * Stoney a résumé ses idées (Scient.Trans.Royal Dublin Soc. 4, 563 (1891)) de la manière suivante : "Attention must be given to Faraday's Law of Electrolysis, which is equivalent to the statement that in electrolysis a definite quantity of electricity, the same in all cases, passes for each chemical bound that is ruptured. The author called attention to this form of the law in a communication made to the British Association in 1874 and printed in the Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society of February, 1881, and in the Philosophical Magazine for May, 1881, pp. 385 and 386 of the later. It is there shown that the amount of this very remarkable quantity of electricity is about the twentieth (that is $1/10^{20}$) of the usual electromagnetic unit of electricity, i.e., the unit of the Ohm series. "This is the same as 3 eleventhets ($3/10^{11}$) of the much smaller C.G.S. electrostatic unit of quantity. A charge of this amount is associated in the chemical atom with each bound. There may accordingly be several such charges in one chemical atom, and there appear to be at least two in each atom. These charges, which it will be convenient to call "electrons", cannot be removed from the atom, but they become disguised when atoms chemically unite".

* * Les premières tentatives de mesure de la charge de l'électron remontent à Townsend qui constata en 1897 que les gaz provenant de l'électrolyse portent une charge électrique de 5.10^{-3} u.é.s./cm³. C.T.R. Wilson (Proc.Camb.Phil.Soc.9,333,1897) trouve la valeur 3.10^{-10} u.é.s. et l'année suivante J.J. Thomson (Phil.Mag.46,528,1898) commence une série de mesures, poursuivies en 1903, avec le résultat $3,4.10^{-10}$. Les mesures de H.A. Wilson (Phil.Mag.5,429,1903) ont conduit à une valeur moyenne de $3,1.10^{-10}$ u.é.s.

On trouvera dans le livre de Millikan (Electrons (+ and -) Protons, Photons, Neutrons and Cosmic Rays, Cambridge U.S.A. 1935) un remarquable exposé de ses mesures délicates.

Il n'est pas sans intérêt de signaler que vers la même époque, Ehrenhaft, en étudiant le mouvement brownien, pensait (Physik.Z.11,619,940,1910) avoir découvert des charges plus faibles que celle de l'électron, fait qu'il interprétait comme étant en défaveur de la théorie atomistique de l'électricité. Ces mesures furent sévèrement critiquées par Millikan, qui les a qualifiées de "grotesques". Mais Ehrenhaft entêté revient à la charge en 1914 (Wien.Sitzungsber. 123,53,1914; Ann.d.Phys.44,657,1914) avec des résultats plus grotesques encore.

Page 90 * Brown (Phil.Mag.4,161(1838)) était émerveillé par ce mouvement qui lui rappelait la vie elle même. Le belge Carbonelle (Rev.Quest.Sci. Louvain,7,5(1880)) semble être le premier à avoir suggéré que ce mouvement est dû à l'agitation thermique et Bodoszewski (Dinglers Polyt.J.239,325 (1881)), en étudiant le mouvement des particules de fumée dans l'air, y voit une image approximative des molécules de la théorie cinétique des gaz.

Einstein (Ann.d.Phys.(4),17,549 (1905) ; 19,371 (1906) ; 22, 569 (1907)) proposa un test quantitatif de la théorie du mouvement brownien par l'étude des fluctuations de parcours et Smoluchowski (Ann.d.Phys.21, 756 (1906)) calcula le déplacement moyen dans l'air des particules de rayon 10^{-4} cm. Ehrenhaft (Wien.Ber. 116, 1175 (1907)) et de Broglie (C.R.146,624,1010(1908); 152,1380(1911)) utilise ses mesures sur les émulsions pour calculer le nombre d'Avogadro. Quelques 72 résultats obtenus par 20 méthodes différentes concordent bien aux erreurs près (S.E. Virgo, Science Progress, 27,634,1933).

- * * M.Villard a découvert une troisième sorte de rayonnement radioactif (1900) qui n'est pas dévié par le champ magnétique et auquel a donné le nom de rayons gamma (γ).

Page 92

- * Quelques mois après la publication de la théorie de Bohr et après les travaux de Lenard, Franck et Hertz entreprenaient une série d'expériences qui allaient avoir un retentissement considérable pour l'exploration de l'atome et la vérification de la théorie de Bohr en ce qui concerne l'interprétation des raies spectrales. Avec un dispositif expérimental aussi simple qu'il était astucieux, Franck et Hertz, arrivent à montrer que, si pour les électrons d'énergie très faible (quelques eV) ceux-ci rebondissent sur les atomes comme de sphères élastiques avec une très faible perte d'énergie, les phénomènes prennent une allure toute différente pour les électrons de plusieurs électron-volts (4-20 eV). Le choc n'est plus élastique, les électrons perdent des quantités plus importantes d'énergie qui sert à augmenter l'énergie interne de l'atome, qui passe ainsi progressivement à des états de plus en plus excités, pouvant aller jusqu'à l'ionisation de l'atome (expulsion d'un électron). Ce phénomène, qui par bien des aspects rappelait l'effet photo-électrique, se produit d'une manière discrète et non-continue. Bohr et Bigl ont suggéré son interprétation correcte, parfaitement vérifiée par la suite, grâce à un grand nombre de travaux (surtout aux U.S.A.) et par la détection spectroscopique des raies émises par désexcitation de l'atome ainsi excité.

Ce fut un des grands premiers succès de la théorie de Bohr du côté expérimental. Nous verrons dans la deuxième partie de ce travail le développement considérable de la physique des électrons très rapides (plusieurs GeV) pour l'exploration non plus de l'atome, mais du noyau et plus spécialement du nucléon lui-même qui semble se comporter comme un objet complexe (modèle des quarks ou des partons).

Signalons enfin la grande stabilité de l'électron, dont la vie moyenne est de l'ordre de 5.10^{21} années (R.Steinberg, Phys. Rev.12D 2582,1975). Celle du proton est encore plus grande ($\sim 10^{30}$ a.), mais nous reviendrons sur cette dernière question qui est d'une actualité brûlante.

- * * De même J.R. Rydberg (Zeitschr.f.anorg.Chemie,14,66,1897) suggérait que le numéro d'ordre (ordinals) des éléments, plutôt que les poids atomiques, doivent être utilisés en tant que variables indépendantes pour l'étude des propriétés des éléments. Il en a même donné une curieuse représentation en spirale du système périodique (Lunds. Univ. Arsskrift,9,n°18,1913).

Page 97

- * Pour une anticipation de Mendéléev sur le défaut de masse et l'équivalent Masse-Energie voir S. Sambursky, Isis,60,104 (1969). Néanmoins cette équivalence ne concerne ni les molécules ni les atomes, mais uniquement les noyaux (nucléons) ; il est donc pratiquement impossible que Mendéléev ait eu une intuition quelconque sur ce sujet à son époque.

Page 99

- * Le photon voyage toujours à une vitesse égale à celle de la lumière, on admet que sa masse est nulle. D'après de nombreuses tentatives entreprises depuis 1770 pour déterminer expérimentalement cette masse il ne semble pas que le photon puisse avoir une masse supérieure à $10^{-10} - 10^{-15}$ eV (pour une discussion plus détaillée voir A.S. Goldhaber, M.M. Nieto, ReV. Mod.Phys.43,277,1971).

Page 109

- * A vrai dire Skobelzyn (Z.f.Physik,54,686,1929) avait déjà attiré l'attention sur quelques clichés portant des traces de signe contraire partant d'un même point, mais sans pouvoir préciser s'il s'agissait bien de particules de nature électronique.

Les expériences entreprises par Millikan et Anderson (1931), avec une chambre de Wilson verticale avaient aussi fourni quelques indications ; deux clichés de ce genre furent présentés par Millikan à Cambridge et à l'Institut H. Poincaré et publiés en 1931 dans Science du 18 Décembre.

Le fameux cliché de Anderson a été obtenu le 2 Août 1932.

- * * Ainsi que L.Meitner et Phillip en Allemagne (Naturw.21,286,1933) et Blackett et Occhialini en Angleterre (Nature,131,473,1933).

Page 116

- * Au terme nuclon proposé pa Pauli et Belinfante (Physica,7,177,1940), Pauli et Dancoff (Phys.Rev.62,85,1942) ont substitué le terme plus heureux de nucléon.

Page 119

- * D. Ivanenko (Nature,129,798,1932) avait suggéré, après la découverte de Chadwick, qu'un spin 1/2 pour le neutron, rendait bien compte du spin et de la statistique des noyaux.

Page 122

- * La nature continue des spectres avait été mise en évidence par Chadwick (Verhandl.d.deutschen Phys.Ges.16,383,1914) mais leur interprétation n'était pas facile. Il n'était particulièrement pas clair si les électrons émis étaient effectivement des électrons primaires ou provenaient d'un processus secondaire. De plus certains radioéléments présentaient, superposées au spectre continu, des raies discrètes et un rayonnement gamma. D'où deux tendances différentes d'interprétation, celle de Ellis⁽⁹⁵⁾ qui pensait que les électrons d'énergie discrète provenaient de la conversion interne des gammas monochromatiques, provenant du noyau et celle de L. Meitner (Z.f. Physik,9,101,145,1922; 11,35,1922) qui soutenait que les électrons monocinétiques étaient d'origine nucléaire et en expulsant des électrons du cortège provoquaient l'étalement du spectre.Elle montra par la suite que le rayonnement gamma était émis après l'émission des électrons ou des particules alpha (Z.f.Physik,34,807,1925).

Ce différent a été résolu par les mesures calorimétriques de Ellis, confirmées par Meitner⁽⁹⁵⁾ sur le RaE.Meitner a même pu montrer que ce nuclide n'émet pas de rayons gamma, qui, n'étant pas complètement absorbés dans le calorimètre, auraient pu fausser les mesures. Ainsi il ne restait plus que deux possibilités :

Ou bien là conservation de l'énergie est en défaut et ne vaut que d'une manière statistique (Bohr);

Ou bien une particule neutre émise simultanément emportait l'énergie manquante (hypothèse du neutrino de Pauli).

* * Sur cette importante question on consultera avec profit les exposés très documentés de J. Bromberg (Hist.Studies in the Physical Sci.3,307,1971) et de M.J. Klein (ibid;2,1,1970). Voici un résumé de la situation : après la découverte de l'effet Compton, Bohr avait suggéré que dans ce phénomène l'énergie n'est pas conservée (N. Bohr, H.A. Kramers, J.C.Slater, Phil.Mag.47,785,1924).

D'un autre côté G.P. THomson (Nature,121,615,1928;Phil.Mag.7,405,1929) avait émis l'hypothèse que dans l'acte individuel de l'émission radioactive d'électrons, l'énergie ne peut pas être conservée, à cause de l'élargissement du paquet d'ondes qui conduit à l'accélération de certains électrons (front avant du paquet) et au retardement d'autres (front arrière).

Par contre Bohr semblait satisfait avec la validité de la conservation de l'énergie dans les phénomènes quantiques (Nature,121,579,1928), sans pour autant renoncer à sa non-conservation en radioactivité bêta qui, pensait-il, n'était pas du domaine de la Mécanique Quantique. Cette violation pourrait même expliquer, semble-t-il, la production d'énergie par les étoiles. Pauli a vivement réagi contre cette idée qui ne le satisfaisait pas. "Laissez cette note de côté pour le moment", écrit il à Bohr, "et laissez les étoiles rayonner en paix".

Tout autre était l'attitude de Dirac qui (dans une lettre à Bohr du 9/12/1929) aurait préféré abandonner la théorie atomique plutôt que la conservation rigoureuse de l'énergie. Dirac ne croyait pas à la crise grave de la Physique, dont parlait Bohr. QUant à la question des électrons intranucléaires, dont le spin semblait disparaître, les rendant en quelque sorte passifs à la statistique, Bohr en avait une idée bien sophistiquée : "à strictement parler, nous ne sommes pas justifiés en disant que le noyau contient un nombre défini d'électrons, mais seulement que sa charge négative est égale à un nombre entier de fois la charge élémentaire et, en ce sens, l'expulsion d'un électron par le noyau peut être regardée comme la création d'un électron en tant qu'entité mécanique... On ne peut

donc pas être surpris si ces processus n'obéissent pas aux principes de conservation, comme l'énergie et l'impulsion, dont la formulation est essentiellement basée sur l'idée de particules matérielles". A la proposition de Pauli (hypothèse du neutrino), Bohr aurait préféré des faits expérimentaux plus concluants et ce n'est finalement qu'en 1936, après les éclatants succès remportés par la théorie de Fermi, qu'il s'est laissé convaincre de la conservation stricte de l'énergie dans la radioactivité bêta.

Page 124

- * Dans le langage des théoriciens l'hamiltonien est de la forme :

$$\mathcal{H} = g(\bar{\Psi}_e \circ \Psi_p)(\bar{\Psi}_p \circ \Psi_n) + h.c.$$

où $\psi, \bar{\psi}$ sont des opérateurs d'annihilation et de création, \circ un des opérateurs ci-dessous :

$S=I$; $V=\gamma_\mu$; $T=\sigma_{\mu\nu}/\sqrt{2}$; $A=i\gamma_5\gamma_\mu$ et $P=\gamma_5$
scalaire vectoriel tensoriel vecteur axial pseudoscalaire

g une constante de couplage de valeur $g = 1,435 \cdot 10^{-49} \text{ erg.cm}^3$; on utilise souvent la grandeur sans dimension $G.M^2 = \frac{g}{\hbar c} \frac{\hbar}{m_c}^2 \approx 10^{-5}$ (où M est la masse du proton).

Page 126

- * Une représentation commode fut introduite par F.N.D.Kurie, J.R. Richardson et H.C. Paxton (Phys.Rev.49,368,1936).

Page 127

- * Cf.C.F.Powell,The Cosmic Radiation (conférence Nobel,1950) et the Nature of the Primary Cosmic Radiation (W.Bothe memorial Lecture) dans Selected Papers of C.F. Powell (London 1972).
- * * Coulomb avait déjà constaté cet effet en 1785.

- * On a dit et répété (Réf.121 et C.D. Anderson, Am.J.Phys.29,875, 1961) que le travail de Yukawa est resté inconnu des expérimentateurs avant la découverte du mésotron par Anderson. L'excuse n'est pas suffisante. En effet, Oppenheimer affirme (Physics Today,19,51,1966) qu'il a été sérieusement pris en considération "because we had advantages as well as obvious disabilities not shared by our colleagues in Europe". Par contre Kemmer (in Hadronic Interactions of Electrons and Photons, Edit.J. CUNNING and H. OSBORN, London-N.Y.1971) fait observer" qu'il n'est pas entièrement inexcusable que l'on n'ait pas pris très au sérieux l'article de Yukawa; une des raisons, qui a empêché certainement la discussion de ce sujet, était l'idée d'introduire encore une nouvelle particule, qui ne semblait pas respectable".

D'ailleurs une petite note a été publiée par Yukawa et Sakata (Phys.Rev.51,677,1937); elle est datée du 18 Février 1937.

Plus curieuse encore est une lettre de Raza Rahman à Yukawa (du 31 décembre 1937), publiée récemment par D.W. Lee et C. Quigg (Comments on Nuclear and Particle Physics,VI(4),93, 1976) :

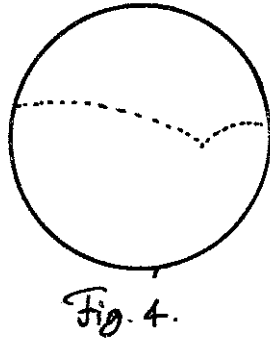
My Dear Yukawa,

The last few years, my associates and I, here at the Royal National Physical Laboratory, have been investigating the validity of Quantum Mechanical version of the Electromagnetic Theory...

I have saved for last the most bizarre, and most exciting, news.

For part of our high-energy running we placed a cloud chamber outside the Geiger plane and triggered its expansion on collinear pairs in the electronic detector. Nearly all the photographs showed trough going tracks, as expected.

One, wich I include as fig.4 was extraordinary. In fact we cannot explain the kink in the electron track, but one speculation is extremely tempting. We way have observed the production of a massive new object which decays into one electron and a neutral object (perhaps a photon?). I am ambarassed to admit



that this may be the mediator of the nuclear force, your mesotron.

This would explain also why excess events were swept away when we turned on the analyzing magnet. The mesotron pairs would carry very little energy.

However, our theoreticians keep reminding me, of the implication of your paper that a mesotron cannot decay into an electron and a photon! Some suggested that the mesotron may decay into an electron and a neutrino of Pauli. It is so ?

These wild conjectures must reveal to you the depth of our confusion. I appeal to you for ideas, either new interpretations or ways to test our own rather naive suggestion...

- * * Le terme mésotron a été proposé par Anderson et Neddermeyer.
La particule de Yukawa a connu plusieurs noms : Quant, Yukon, dynatron, barytron, etc. Bhabha a proposé le nom méson (Nature 143, 276(1939)) au lieu de celui d'électron lourd (heavy electron).

Page 149

- * C'est l'hypothèse de deux mésons de R.E. Marshak et H.W. Bethe (Phys. Rev. 72, 506(1947)).
- * * Les termes pion et muon ont été forgés à Chicago par E. Fermi (Phys.Rev.81,683(1951)). On rencontre pour la première fois le muon dans un article de L.C.Teng, élève de Fermi (Phys.Rev.84, 308(1951)).

- * Une particule fictive, le neutretto : il existe une littérature assez confuse sur une particule neutre lourde ou "électron lourd neutre", dont le nom semble être dû à Kemmer et qui fut envisagée afin de rendre compte de la force attractive $p\bar{p}$ ⁽¹⁸⁵⁾ ; son existence adoptée par Yukawa (Proc.Phys.Math.Soc.Japan,20,319 (1938)) a été jugée superflue pour le développement de la théorie par Bhabha (Proc.Roy.Soc.166,501(1938)). Sakata et Tanikawa (Phys.Rev. 57,548(1940)) font intervenir un méson de Yukawa neutre Y^0 dans les processus :

$$p = p + Y^0 \quad \text{et} \quad n = n + Y^0$$

Cet Y^0 , très instable, devrait se désintégrer en deux photons avec une vie moyenne de l'ordre de 10^{-16} s, ce qui expliquerait pourquoi ce "neutretto" n'avait pas encore été vu, mais Marshak (Phys.Rev.57,1101(1940)) montrait une certaine réticence pour l'introduction d'une nouvelle particule inobservable dans la théorie. Un Y^0 , contre partie neutre de Y^+ et Y^- , mais plus léger que ceux-ci, a aussi été envisagé par Noma (Progr.Theor. Phys.1,71(1946;3,54(1948))) dans les processus:

$$p = n + Y^+ + Y^0 \quad \text{et} \quad n = p + Y^- + Y^0$$

mais cette théorie conduisait à une mauvaise interaction $p\bar{n}$.

Dans un séminaire tenu en 1942, Tanikawa (progr.Theor.Phys.2, 220(1947)) suggérait que le méson cosmique (qu'il supposait être un boson de spin 0) pouvait être différent du méson nucléaire, une hypothèse formulée par Sakata et Inoue (Progr.Theor.Phys.1,143(1946)) suivant laquelle le méson nucléaire de Yukawa devait avoir une masse double de celle du méson cosmique (de spin 1/2), afin de permettre la désintégration :

$$\text{Particule de Yukawa} = \text{méson cosmique} + \text{méson neutre de masse négligeable.}$$

C'est l'hypothèse de deux mésons, équivalente à celle de Bethe-Marshak (Phys.Rev 72,506 (1947)).

Mais en 1947, Anderson et ses collaborateurs (Phys.Rev.72,724 (1947)) ont trouvé un mésotron cosmique qui se désintégrait en un électron de 24 MeV et une particule neutre de masse ~ 70 MeV. Marshak suggéra alors (Phys.Rev.73,1226 (1948)) que ce méson

pourrait être identifié avec la particule neutre de désintégration du métron lourd en méson léger, suivant le schéma :

$$\begin{aligned} \text{Méson lourd} &= \text{méson léger chargé} + \text{méson neutre} \\ (\text{pion positif} &= \mu^+ + \mu^0) \end{aligned}$$

Or, peu avant la découverte du pion, Potecorvo (Phys.Rev.72,1226 (1948)) avait signalé que le méson nucléaire ne peut pas être la particule responsable de la radioactivité β , mais devrait se désintégrer en une particule de spin 1/2 et deux neutrinos ; ensuite, après la découverte du pion, Pontecorvo et Hincks (Phys.Rev.73, 1122 (1948)) ont soutenu que la particule neutre de désintégration du muon ne peut pas être un méson neutre et que, même si c'était le cas, ce méson neutre ne peut pas se désintégrer en 2γ en moins de 10^{-10} s.

Par la suite, l'étude du spectre des électrons de désintégration du muon (Tiomno et Wheeler, Rev.Mod.Phys.21,144(1949)) a conduit au schéma de désintégration :

$$\mu^+ = e^+ + 2\nu$$

confirmé à l'aide des accélérateurs (Sagane, Gardner, Hubbard, Phys.Rev.82,557(1951)). Cependant plusieurs théoriciens (Horovitz, Kofoed-Hansen, Lindhard, Phys.Rev.74,713(1948)); Uhlenbeck, Chang, Phys.Rev.85,684(1952)) étaient en faveur de la chaîne :

$$\pi^+ = \mu^+ + \mu^0 \qquad \mu^+ = e^+ + \mu^0 + \nu$$

μ^0 étant un neutretto.

Ce neutretto, tantôt identifié avec le π^0 , tantôt avec le μ^0 ou le ν , a finalement disparu de la littérature après la découverte du π^0 , membre du triplet de spin isotopique $\pi^+\pi^0\pi^-$, dont la désintégration en deux photons a été confirmée par Steinberger, Panofsky et Steller (Phys.Rev.78,802(1950)). Mais cette disparition a été assez lente, puisque vers 1957 encore Marshak et Sudarshan (Nuovo Cimento 6,1355 (1957)) envisageaient le schéma de désintégration du K^+ :

$$K^+ = \mu^+ + \mu^0$$

On voit parfois dans la littérature attribuer le nom de neutretto au neutrino muonique (dans le cas où sa masse ne serait pas nulle).

Voir aussi : G.E.Uhlenbeck, C.S. Wang Chang, Phys.Rev.85,684(1952).

Ce problème revient à la mode depuis que les théoriciens envisagent, à propos des théories de jauge, l'existence de nouveaux leptons chargés et neutres, dont les derniers pourraient avoir une masse non-nulle et par conséquent hériter du nom de neutretto.

Page 159

- * Cette nomenclature a été largement diffusée parmi les physiciens de tous les pays par plusieurs publications :

E. Amaldi, C.D. Anderson, P.M.S. Blackett, W.B. Fretter,
L. Leprince-Ringuet, B. Peters, C.F. Powell, C.D. Rochester,
B. Rossi et R.W. Thompson, Nuovo Cimento, 11, 213 (1954)

Nature, 173, 123 (1954)

C.R. 238, 25 (1954)

Naturwiss. 46, 56 (1954)

Phys. to Day, 6, 24 (1953)

On la trouve aussi dans les Comptes Rendus du Congrès International sur le rayonnement cosmique (organisé par l'Université de Toulouse sous le patronage de l'U.I.P.P.A. avec l'appui de l'U.N.E.S.C.O.). Bagnères de Bigorre, 6-12 Juillet 1953, p.269(J-1), ainsi que dans : L. Leprince-Ringuet, Ann. ReV. Nucl. Sci. 3, 39 (1953).

Page 163

- * La forme du spectre de l'électron dépend de la nature des deux particules émises en même temps que lui et peut être caractérisée par un paramètre, qui est une fonction quadratique des différentes constantes de couplage, le paramètre ρ de Michel, suivant la formule :

$$N(x) = 4x^2 (3(1-x) + (2/3) \rho (4x-3)x^2)$$

avec $x = 2E/m_{\mu}$, E = énergie de l'électron.

Si les deux neutrinos sont identiques (2ν ou $2\bar{\nu}$) on doit avoir un spectre qui, pour l'énergie maxima de l'électron, s'annule, ce qui correspond à $\rho = 0$. Si les deux neutrinos sont différents, la distribution de l'énergie est différente avec une pente nulle à la fin du spectre, ce qui donne $\rho = 3/4$ (L. Michel, Nature, 163, 959, 1949; Proc. Phys. Soc. A63, 514, 1950).

Le meilleur ajustement des valeurs obtenue donne :

$$\rho = 0,752 \pm 0,003$$

Page 164

- * On a aussi été amené à introduire pour les leptons (électrons, muons et neutrinos) de nouveaux nombres quantiques, dont les valeurs sont données par le tableau suivant :

Nb.quantique	Particules leptoniques							
	e^-	e^+	μ^-	μ^+	ν_e	$\bar{\nu}_e$	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$
Hélicité	$-\beta$	$+\beta$	$-\beta$	$+\beta$	-1	1	-1	1
Nb.leptonique	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
Nb.électronique	1	-1	0	0	1	-1	0	0
Nb.muonique	0	0	1	-1	0	0	1	-1

Il n'est pas certain actuellement, si ces nombres sont additifs ou multiplicatifs, mais l'additivité n'a jamais été mise en défaut. L'hélicité est définie comme la projection du vecteur polarisation sur la direction du mouvement de la particule.

Page 166

- * Ce fait a été établi de la manière suivante :

Considérons la réaction de capture d'un π^- par le deuton (spin 1) au repos; l'expérience montre ⁽⁷⁸⁾ que cette capture se fait à partir d'une orbite K, et, par conséquent, le système ($d\pi^-$) se trouve dans un état de moment angulaire 1 et a la même parité que le π .

Les deux neutrons (de parité +) peuvent être dans un état S , $P_{0,1,2}$ ou $D_2...$ (à cause du principe de Pauli), dont seul l'état 3P_1 a un spin 1. Or la parité d'un tel état est négative :

$$\text{parités : } (P_\pi^-) \cdot (\text{Parité orbitale } +) \cdot P_d = P_{(nn)}$$

$$\text{d'où, } J_\pi^P = 0^-.$$

- * Pour un processus de la forme :

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4 + Q$$

où les m_i sont les masses des particules qui y participent, l'énergie Q libérée (absorbée) est définie par :

$$Q = (m_1 + m_2)^0 - (m_3 + m_4).$$

C'est aussi la somme des énergies cinétiques au seuil des particules du premier membre dans le référentiel du centre de masse.

Pour une particule qui se désintègre au repos, c'est donc la somme des énergies cinétiques des produits de désintégration.

La formule précédente se généralise aisément pour n'importe quel autre processus.

- * Pour une collision entre deux particules de masses respectivement m_1 et m_2 et d'impulsions opposées \vec{p}_1 et \vec{p}_2 , l'énergie dans le centre de masse est :

$$E^* = (m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 + 2p_1p_2)^{1/2}$$

Pour avoir cette même énergie dans le centre de masse dans le cas où la particule de masse m_2 est au repos, la particule de masse m_1 doit avoir une énergie dans le système du laboratoire :

$$E'_1 = (E_1E_2 + p_1p_2)/m_2$$

Pour des énergies très grandes par rapport aux masses, on a :

$$E^* = 2\sqrt{E_1E_2} \quad ; \quad E'_1 = 2E_1E_2/m_2$$

- * Et cela malgré les protestations de G. Chew

Page 202

- * Cette dénomination avait été proposée par C. Møller et employée par L. Rosenfeld dans son livre Nuclear Forces (Amsterdam, 1948).

Page 218

- * Gell-Mann s'est expliqué plus tard là-dessus de la façon suivante :
"In my case it was a matter of discovery by slip of the tongue. Discussing the heavy strange particles one day, I spoke of them as having an isotopic spin of 1, but then quickly corrected myself, saying "I mean a half of course'."

"The more I thought about the "mistake" later on, the more I began to wonder whether it really was one".

Page 227

- * Une légère asymétrie (de l'ordre de 3%) entre les électrons à 90° et à 270° avait été observée dès 1928 par R.T. Cox, C.G. McIlwraith et B. Kurrelmeyer (Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 14, 544 (1928)), mais les difficultés expérimentales de l'époque ont découragé la poursuite des expériences.

Page 228

- * Il n'est pas sans intérêt de constater qu'en 1952, G.S. Wick, A.S. Wightman et E.P. Wigner (Phys. Rev. 88, 101 (1952)) signalaient que "the disturbing possibility remains that C and P are both only approximate and CP is the only exact symmetry".

Page 253

- * Il est d'usage courant de présenter les résultats expérimentaux en termes de variables de Mandelstam s , t et u définies par :

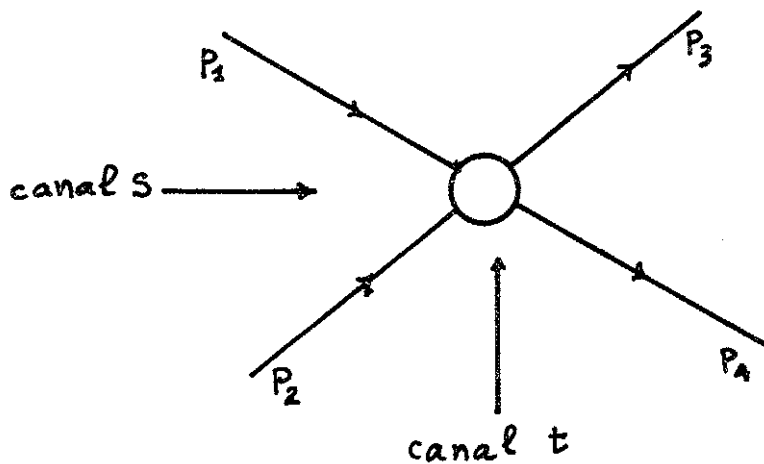
$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2$$

$$u = (p_1 - p_4)^2 = (p_2 - p_3)^2$$

$$\text{avec } s + t + u = \sum_i m_i^2$$

s est l'énergie dans le centre de masse
t est le 4-moment transféré dans le canal t
u est le 4-moment transféré dans le canal u.



Page 294

- * Pour les recherches plus récentes voir réf.503e.
- * * Sur cette question voir M.Bander, Phys.Rep.75(4),205(1981)

Page 295

- * L'introduction de trois couleurs tient à des raisons de conformité spin-statistique. Par exemple le $\Delta(3/2,3/2)$ ou le Ω^- étant composés de trois quarks de même saveur auraient une fonction d'onde symétrique:

$$\psi = \psi_{\text{spin}}^S \cdot \psi_{\text{saveur}}^S \cdot \psi_{\text{espace}}^S$$

tandis qu'en introduisant en plus la fonction antisymétrique ψ_{couleur}^A la fonction totale ψ devient antisymétrique, comme il se doit.

Page 308

- * A cette occasion Reines et Cowan ont adressé le 15 Juin 1956 le télégramme suivant à Pauli : "We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse β -decay of protons. Observed cross-sections agree well with expected value of $6,00 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$ ".
La réponse laconique de Pauli fut : "thanks for message. Everything comes to him who knows how to wait".

Page 311

- * Il s'agit des années avant 1960.

Page 314

- * Au lieu de considérer que L_e et L_μ sont séparément conservés, on définit une parité muonique $P_\mu = (-1)^{L_\mu}$ qui, si elle est conservée, constitue une loi multiplicative. Dans ce cas L_μ n'est pas nécessairement conservé, mais dans tout processus on doit avoir une variation $\Delta L_\mu = \text{pair}$, afin que la parité muonique soit conservée.
Le nombre leptonique L étant additivement conservé, ces deux schémas conduisent, dans la plupart des cas à des résultats identiques ; il est cependant possible de les différencier, comme G. Kalbfleisch (Nucl.Phys.B25,197,1970) l'a suggéré, par l'étude des processus :

$$\mu^+ = e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad \text{(I)}$$

$$\mu^+ = e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{(II)}$$

dont le premier est permis dans les deux cas, tandis que le second n'est permis que par une loi multiplicative uniquement, car on a $\Delta L_e = \Delta L_\mu = 2$. Si alors on définit le rapport :

$$\alpha = \frac{\text{taux de désintégr. } (\mu^+ = e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu)}{\text{taux de désintégr. } ((\mu^+ = e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu) + (\mu^+ = e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu))}$$

on doit avoir :

$\alpha = 1/2$ pour une loi multiplicative et

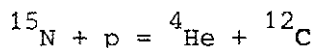
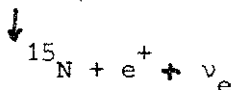
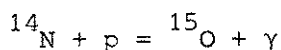
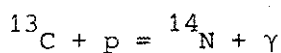
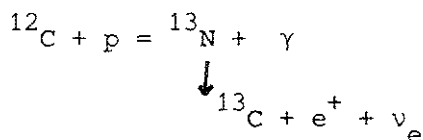
$\alpha = 0$ pour une loi additive.

Une expérience effectuée au C.E.R.N. (E. Eichten et al. Phys. Letters, 46B,274,1973) a donné pour valeur $\alpha < 0,24$, ce qui semble en faveur d'une loi additive.

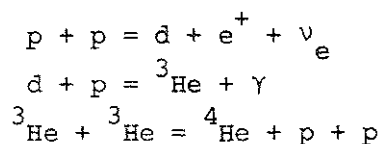
- * * A noter cependant qu'à partir de considérations cosmologiques G. Marx et A.S. Szalay (Neutrino 72, Vol.I, P.191. Europhysics Conference Hungary 1972) arrivent à la valeur bien plus faible de 13,5 eV (Neutrino'75, IUPAP Conference, Balatonfüred-Hungary, 12-17 Juin 1975, Vol.II, P.411). Pour bibliographie plus récente voir réf.503e, ainsi que D. Cline, W.Fry, Ann.Rev.Nucl.Sci 27, 209 (1977) et P.H.Frampton, P.Vogel, Phys.Rep. 82(6) 339 (1982).

Page 316

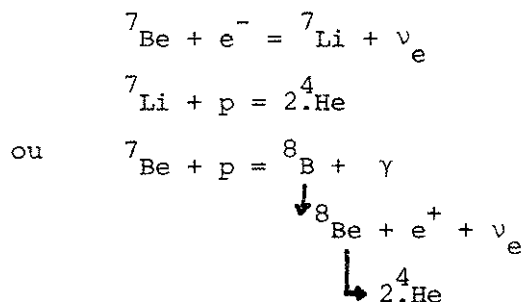
- * Depuis la suggestion de Gamov et Houtermans (Zeits.f.Physik 52,496, 1929) sur l'origine thermonucléaire de l'énergie émise par les étoiles, l'étude des réactions nucléaires responsables de cette énergie a fait l'objet des travaux de C.F.Weizsäcker (Physik.Z. 39, 633, 1938) et de H.A.Bethe (Phys.Rev. 55, 434, 1939). Parmi plusieurs processus envisagés, le cycle C-N-O conduit finalement à la formation d'hélium, d'électrons et de neutrinos, le carbone et l'azote agissant en quelque sorte comme catalyseurs :



Le cycle p-e-p convertit l'hydrogène en hélium :



Plus récemment A.G.W. Cameron (Ann.Rev.Nucl.Sci.8,299, 1958) et W.A.Fowler (Astrophys.J.127,551,1958) ont proposé les processus :



Il y aurait donc là en principe un moyen d'effectuer en quelque sorte une radiographie interne d'une étoile à l'aide de ses propres neutrinos et de mettre en évidence le processus de leur production. Malheureusement les énergies des neutrinos en question sont trop faibles (à l'exception du dernier processus qui donne des neutrinos de ~ 14 MeV), d'où les grandes difficultés technologiques de leur détection (Cf.V.Trimble,F.Reines,Rev.Mod.Phys.45,1,1973).

Comme Pontecorvo l'a signalé (Sov.Phys.JEPT,37,1751,1959), si l'interaction neutrino-électron est importante, les neutrinos emporteraient vers l'extérieur d'une étoile des quantités d'énergie beaucoup plus grandes que celle rayonnée dans le spectre visible, mais la section efficace théoriquement estimée d'une telle interaction correspond à un libre parcours moyen du neutrino de $\sim 10^7$ rayons solaires.

Un autre aspect cosmologique de la physique des neutrinos, suggéré par S.Weinberg (Nuovo Cimento,25,15,1962 et Phys.Rev.128,1457, 1962), est sa grande importance sur le comportement de l'univers dans son évolution (expansion indéfinie ou non).

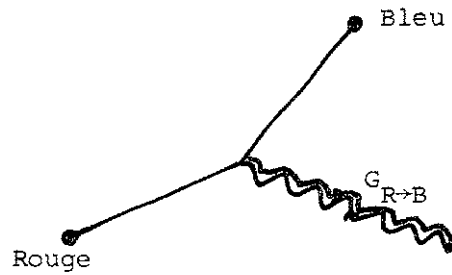
Et dire que "chaque seconde du jour et de la nuit 10^{11} neutrinos traversent chaque centimètre carré de notre corps, sans que l'on ait détecté un seul (M.A.Ruderman,C.E.R.N. Topical Conf. on Weak Interactions, Rapport jaune CERN 69-7, p.111). Peut être qu'il y a du nouveau sous le soleil (W.A. Fowler,Caltech, Tech.Preprint OAP 507)(Cf.F.Wilczek,Comments Nucl.Part.Phys.10(5)175,1981).

- * Les valeurs données sont celles de B.C. Barish et al., Phys.Rev. Letters,35,1316 (1975).
- * * La théorie unifiée de Georgi et Glashow nécessite l'existence d'un boson lourd de quelques 10^{-9} g. (Phys.Rev.Letters,32,438 (1974)).

- * Le terme gluon se trouve déjà dans l'article bien connu de M.Gell-Mann,Phys.Rev.125,1067(1962). Une note de S.M. Berman, Phys.Rev.D4,3388(1971) en attribue (selon une communication privée à Kuti et Weisskopf) la paternité à R. Feynman. Les gluons ont une masse nulle et sont porteurs de charge de couleur. Parmi les 9 combinaisons des couleurs et anticouleurs 3 sont chromatiquement neutres se réduisant à deux G_1 et G_2 gluons incolores à cause de la non-indépendance des trois couleurs ; il reste donc 6 gluons colorés induisant les changements des couleurs quarks $G_{i \rightarrow j}$ (avec $i, j = \text{Rouge, Vert, Bleu}$ et $i \neq j$) comme l'indique la matrice 3 x 3 ci-dessous où nous avons attribué à chaque couleur une valeur chromatique +1 et à chaque anticouleur (Cyan, Magenta, Jaune) la valeur -1 : Rouge (1,0,0), Vert (0,1,0), Bleu (0,0,1), tandis que les gluons colorés se voient attribuer deux valeurs chromatiques de signes opposés (cf. réf. 503 d) :

Quarks	Rouge (1,0,0)	Vert (0,1,0)	Bleu (0,0,1)
Rouge (1,0,0)	$G_1 + G_2$	$G_{R \rightarrow V}$ (1,-1,0)	$G_{R \rightarrow B}$ (1,0,-1)
Vert (0,1,0)	$G_{V \rightarrow R}$ (-1,1,0)	$G_1 + G_2$	$G_{V \rightarrow B}$ (0,1,-1)
Bleu (0,0,1)	$G_{B \rightarrow R}$ (-1,0,0)	$G_{B \rightarrow V}$ (0,-1,1)	$G_1 + G_2$

Suivant qu'il y a émission ou absorption d'un gluon on est donc dans la situation de la figure suivante :



$$\begin{aligned} \text{Rouge} &\rightleftharpoons \text{Gluon} + \text{Bleu} \\ (1,0,0) &\rightleftharpoons (1,0,-1) + (0,0,1) \end{aligned}$$

Les boules de 2 ou 3 gluons doivent être chromatiquement neutres, comme les combinaisons :

$$\begin{aligned} G(1,0,-1) + G(-1,0,1) &\rightarrow GG(0,0,0) \\ G(-1,1,0) + G(+1,0,-1) + G(0,-1,1) &\rightarrow GGG(0,0,0) \end{aligned}$$

Pour l'état de la situation actuelle sur les boules de gluons voir J. Ellis, Comments Nucl.Part.Phys. 9(5)153(1981); 10(6)277(1982).

- * * Nous avons traduit le terme anglais "flavour" par saveur; on pourrait tout aussi bien lire parfum, odeur ou goût. Comme pour la couleur il s'agit d'une notion abstraite.

Page 347

- * Les expériences récentes conduisent à la valeur $\sin^2 \theta_W = 0,23 \pm 0,015$.

Page 349

- * Dès les débuts de la théorie électro-faible de Weinberg-Salam-Ward-Glashow (réf.523), Salam et Ward (réf. 524) ont postulé (1960) "qu'il devrait être possible de générer les termes des interactions fortes, faibles et électromagnétiques, avec toutes leurs propriétés correctes de symétrie, en effectuant des transformations locales de jauge sur le terme d'énergie cinétique du Lagrangian libre de toutes les particules.

Les succès emportés par la théorie $SU(2) \times U(1)$ tant sur le plan théorique qu'expérimental pendant une vingtaine d'années, l'élaboration des théories de jauge et de renormalisation, le grand succès de la symétrie $SU(3)$ dans le domaine des interactions fortes, ont amené Pati et Salam (réf. 525) à revenir sur cette ancienne idée. Un Lagrangien possédant une symétrie interne supérieure à celle des groupes $SU(3)$ et $SU(2) \times U(1)$ englobant ceux-ci et due à la présence indispensable de nouvelles particules scalaires (O^+), serait capable de décrire l'ensemble des interactions connues à l'exception de la gravitation. Le fait que cette symétrie, de Groupe G , ne soit pas actuellement observée dans la nature était dû à une brisure spontanée de la symétrie, attribuée à la structure granulaire du vide qui devenait asymétrique (polarisation).

Comme Salam l'explique dans sa conférence du prix Nobel (1979), trois idées principales ont conduit à cette théorie de grande unification :

(1) Le choc psychologique provoqué par le groupement des quarks et des leptons dans un même multiplet du groupe d'unification G , non-abélien, si tous les nombres quantiques (saveur, couleur, nombre des leptons, des quarks et le nombre de familles) devraient être automatiquement quantifiés et la théorie de jauge résultante être asymptotiquement libre.

(2) L'extension proposée par Georgi et Glashow (1974), qui place non seulement les quarks et les leptons (gauches) mais aussi leurs antiparticules dans le même multiplet du groupe d'unification.

Maintenant une théorie de jauge basée sur un groupe "simple" G contient une constante de jauge de base. Cette constante doit se manifester physiquement au delà de la masse M de la grande unification, dépassant les masses de toutes les particules de la théorie-elles mêmes étant générées (si possible) hiérarchiquement par un mécanisme adéquat de rupture de symétrie.

(3) Le troisième développement crucial était dû à Georgi, Quinn et Weinberg (1974), qui montrèrent comment, en utilisant des idées de groupe de renormalisation, on pouvait relier les constantes de couplage observées à basse énergie $\alpha(\mu)$ et $\alpha_g(\mu)$ ($\mu \sim 100$ GeV) à

la grandeur de la masse M de grande unification et à la valeur observée de $\sin^2 \theta(\mu)$; ($\text{tg} \theta$ est le rapport des couplages $U(1)$ sur $SU(2)$).

Les résultats des calculs montrent que cette grande unification ne peut être obtenue que pour une masse $M \sim 5 \cdot 10^{15}$ GeV et pour une valeur de $\sin^2 \theta = 0,20 \pm 0,01$ (la valeur expérimentale est de $0,23 \pm 0,015$).

C'est une double victoire, dit M. Gaillard (réf.522 f)!. Cette masse est bien inférieure à la masse de Planck $M_P = 10^{19}$ GeV et les valeurs théorique et expérimentale de $\sin^2 \theta$ sont bien compatibles.

- * * Les différentes théories de Supergravité (supersymétries) et "Supersymétries étendues" comportent comme particules de jauge sans masse le graviton de spin 2, un à huit gravitinos de spin 3/2 ainsi qu'un nombre variable selon les modèles de particules de spin 0, 1/2 ou 1.
- * * * Pour les différentes représentations fondamentales du groupe $SU(5)$ et les mécanismes de communication entre le monde des leptons et celui des quarks, voir réf.522 d,e,f,.

Page 357

- * En particulier la faible largeur de ψ et de ψ' relativement à celle bien plus grande de ψ'' est difficile à expliquer. Le modèle des quarks fournit une interprétation assez satisfaisante à l'aide d'une règle proposée par Okubo, Zweig et Iizuka (règle OZI) (S.Okubo, Phys. Lett. 5,165,1963; G. Zweig, J. Iizuka, Progr. Theor. Phys. 1966, Suppl. 21, p.37). Il s'agit d'une règle de sélection interdisant l'annihilation d'une paire quark-antiquark étrange à l'intérieur d'un hadron : une particule contenant uniquement des quarks étranges ne peut se désintégrer en particules non-étranges. Ainsi le méson φ constitué de deux quarks étranges ($\lambda\bar{\lambda}$) se désintègre préférentiellement ($\sim 80\%$ des cas) en deux mésons étranges K et \bar{K} avec une largeur de $\sim 4,2$ MeV et plus rarement en trois pions ($\pi^+ \pi^- \pi^0$), quoique cette dernière désintégration soit énergétiquement

plus favorisée (espace de phase bien plus grand). Par une extension de la règle de Zweig aux quarks charmés, une particule contenant uniquement des quarks charmés ne peut se désintégrer en particules non charmées. Les particules ψ et ψ' se désintègrent donc de préférence en particules charmées, notées D et \bar{D} , si leur masse est supérieure à la somme des masses du D et du \bar{D} ; mais si ce n'est pas le cas, ils se désintègrent en particules ordinaires, en violation de la règle, d'où leur faible largeur. Il en résulte que la masse du ψ et du ψ' doit être inférieure à la somme des masses de D et \bar{D} , ce qui donne une estimation de la masse du D et du \bar{D} (à partir des masses connues de ψ et ψ') qui est de 1,85 à 2 GeV.

Par contre la masse de ψ'' étant supérieure à 4,0 GeV, celui-ci peut se désintégrer facilement (par voie forte) en $D+\bar{D}$ (qui à leur tour se désintègrent en particules ordinaires), d'où sa grande largeur.

Page 369

* La spectroscopie des quarkonia comprend aussi celle des états liés de deux ou trois gluons, appelés boules de glu (glueballs) (réf.503 et - BMS Physics Today, July 1981, p.20; K. Ishikawa, Scient.Amer.247 (5) 122 (1982)).

En effet les gluons sans masse et de spin 1, comme le photon, portent une charge de couleur pouvant les lier ensemble en une nouvelle forme de matière sans quarks. Les théoriciens prévoient différents états de spin-parité 0^+ (scalaire), 0^- (pseudoscalaire) et 2^+ (tenseur) de vie moyenne aux environs de 10^{-25} s, donc difficiles à détecter autrement qu'en tant que résonnances ayant ces nombres quantiques ; leur masse est estimée à 1 - 2 GeV. Le méson E(1420) vu depuis longtemps au CERN (P. Baillon et al, N.C. 501,393,1967) pourrait être un candidat, ainsi que les mésons Iota (1440) 0^- et Théta (1670) 2^+ récemment annoncés (D. Scharre et al., Phys.Rev.Lett.48,458, 1982), pour lesquels les théoriciens ne sont pas tout à fait convaincus (J. Donoghue et al. Phys. Lett. 99B,416,1981; Comments Nucl.Part.Phys.10(6),277,(1982) ; M. Chanowitz, Phys.Rev.Lett.48,458,1982).

Page 370

- * Pour les différents modèles considérant les quarks et les leptons comme des particules composites voir H. Terazawa, Phys.Rev.D22,184(1979); S. Brodsky, S. Drell, Phys. Rev D2, 2236 (1980); K. Yamawaki, T. Yokota, Phys. Lett.113B,293 (1982).

Page 380

- * L'aspect cosmologique actuel des spéculations sur l'instabilité du nucléon remonte à l'année 1966, époque à laquelle A.Sakharov (J.E.T.P. Letters, 5(1),24,1967) a proposé une explication de l'asymétrie de l'univers en baryons pourrait être due "au caractère approximatif de la loi de la conservation des baryons". Il donnait une limite inférieure de la vie moyenne du proton de 10^{50} a. Pour l'état de la question avant cette période, les idées récentes et les expériences en cours on peut consulter les réf.522 ainsi que M.Goldhaber, v'80 Intern.Conf.in Neutrino Physics and Astronomy, Erice (Trapani, Italie), M.Goldhaber et al. Science, 210,851,1980; Comments Nucl.Part.Phys.10(5)215,1981.

TABLE DES PARTICULES

a) PARTICULES STABLES

Particule	J^P	Masse (MeV)	Vie moyenne s.	Désintégration Mode	%		
1. PHOTON							
γ	0^-	$< 10^{-22}$	stable	-	-		
2. LEPTONS							
ν_e	$1/2$	$6 \cdot 10^{-5}$	stable	-	-	FERMIONS	
e	$1/2$	0,511	"	-	-		
ν_μ	$1/2$	$< 0,57$	"	-	-		
μ	$1/2$	105,66	$2,19 \cdot 10^{-6}$	$e\nu\bar{\nu}$ $e\nu\bar{\nu}\gamma$	98,6 1,4...		
τ	$1/2$	1807		$\mu\nu\bar{\nu}$	17,5		
ν_τ	$1/2$	≤ 250		$e\nu\bar{\nu}$			
3. HADRONS							
3A. MESONS							
π^\pm	0^-	139,56	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu\nu$ e ν	100 $1,26 \cdot 10^{-4}$	BOSONS	
π^0	0^-	134,96	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$ $\gamma e^+ e^-$	98,85 1,15		
η	0^-	548,8		$\gamma\gamma$ $\gamma\gamma\pi^0$ $3\pi^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^+\pi^-\gamma$ $e^+e^-\gamma$	38 3,1 29,9 23,6 4,9		
(à suivre)							

(suite)

K^{\pm}	0^{-}	493,67	$1,24 \cdot 10^8$	$\mu\nu$	63,5
				$\pi\pi^0$	21,1
				$\pi\pi\pi$	5,6
				$\pi\pi^0\pi^0$	1,73
				$\mu\gamma\pi^0$	3,2
				$e^+\nu\pi^0$	4,8
K^0	0^{-}	497,67	} 50% K_{court} + 50% K_{long}		
\bar{K}^0	0^{-}	"			
K_S^0	0^{-}		$0,89 \cdot 10^{10}$	$\pi^+\pi^-$	68,6
				$\pi^0\pi^0$	31,4
K_L^0	0^{-}		$5,2 \cdot 10^8$	$\pi^0\pi^0\pi^0$	21,5
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	12,4
				$\pi\mu\nu$	27,0
				$\pi e\nu$	38,8
				$\pi e\nu\gamma$	1,3
D^{\pm}	0^{-}	1868,3		$K\pi\pi$	3,9
				$K_{\pm}^0\pi$	1,5
				$e \dots$	9,8...
D^0		1868,3		$K^-\pi^+$	1,8
\bar{D}^0		1868,3		$K^-\pi^+\pi^0$	12,0
				$K^-\pi^+\pi^-\pi^0$	3,5
				$K^0\pi^0$	<6,0
				$K_{\pm}^0\pi^+\pi^-$	4,4
				$e \dots$	9,8...
F^+	0^{-}	2021	10^{-13}	$\eta\pi^+\pi^-\pi^0$	
				$\eta\pi^+\pi^-\pi^0$	
				$\rho+\phi$	

BOSONS

3B. BARYONS

p	$1/2^+$	938,28	stable	-	-
n	$1/2^+$	939,57	918	$pe^-\nu$	100
Λ^0	$1/2^+$	1115,60	$2,6 \cdot 10^{10}$	$p\pi^-$	64,2
				$n\pi^0$	35,8
Σ^+	$1/2^+$	1189,37	$0,8 \cdot 10^{10}$	$p\pi^0$	51,6
				$n\pi^+$	48,4
Σ^0	$1/2^+$	1192,47	$5,8 \cdot 10^{20}$	$\Lambda\gamma$	100

FERMIONS

(à suivre)

(suite)

Σ^-	$1/2^+$	1197,35	$1,48 \cdot 10^{-10}$	$n\pi^-$	100
Ξ^0	$1/2^+$	1314,9	$2,90 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$ $\Lambda\gamma$	100 ?
Ξ^-	$1/2^+$	1321,3	$1,65 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^-$ $\Lambda e^- \nu$	100
Ω^-	$3/2^+$	1672,2	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0\pi^-$ $\Xi^-\pi^0$ } ΛK	100
Λ_c^+	$1/2^+$	2282	10^{-13}	$\Lambda\pi^+\pi^+\pi^-$ $pK-\pi^+$ pK $\Delta^{++}K^-$ $\Lambda\pi^+$	
Σ_c^+		2450		$\Lambda_c^+\pi$	
Λ_b^0		5500		$pD^0\pi^-$	

FERMIONS

b) PARTICULES INSTABLES
(Résonances)

1) MESONS (BOSONS)

Particule	Masse (MeV)	Largeur (MeV)	Désintégration Mode	%
ρ	776	155	$\pi\pi$	100
ω	782	10	$\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^+\pi^-$ $\pi^0\gamma$	90 1,5 8,8
η'	957	1	$\eta\pi\pi$ $\rho\pi$ $\omega\gamma$ $\gamma\gamma$	66 30 2 2
δ	975	50	$\eta\pi, K\bar{K}$?
S^*	980	40	$\eta\pi, K\bar{K}$?
ϕ	1019,6	4	K^+K^- $K_L^0K_S^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\eta\gamma$	49 35 15 1
A_1	1100	300	$\rho\pi$	100
B	1231	128	$\omega\pi$?
f	1271	180	$\pi^+\pi^-$ $2\pi^+2\pi^-$ $K\bar{K}$	80 3 3
D	1282	25	$K\bar{K}, \eta\pi\pi$?
ϵ	1300	300	$K\bar{K}, \pi\pi$?
A_2	1312	102	$\rho\pi$ $\eta\pi$ $\omega\pi\pi$ $K\bar{K}$	70 14 10 5

(à suivre)

(suite)

E	1420	60	$K\bar{K}\pi, \eta\pi\pi$?
f'	1516	65	$K\bar{K}, \pi\pi$?
ρ'	1600	300	4π $\pi\pi$	75 25
A_3	1640	300	$f\pi$?
ω	1668	160	$\rho\pi, 3\pi, 5\pi\dots$?
g	1688	180	2π 4π $K\bar{K}\dots$	24 ? ?
h	2040	193	$\pi\pi, K\bar{K}$?
η_c	2981	20	$\eta\pi^+\pi^-, 2(\pi^+\pi^-)\dots$	
ψ	3097	0,067	e^+e^-	7
			$\mu^+\mu^-$	7
			hadrons	86
			$3(\pi^+\pi^-)\pi^0$	4
			$\pi^+\pi^-\pi^0 K^+K^-$	1
			$\rho\pi$ $4(\pi^+\pi^-)\pi^0$ etc,etc	1 1
χ	3413		$2(\pi^+\pi^-)$	4
			$\pi^+\pi^-K^+K^-$	4
			$\gamma\psi$	4
			$3(\pi^+\pi^-)$ etc,etc	2
P_c	3508		$\gamma\psi$	24
			$3(\pi^+\pi^-)$	3
			$2(\pi^+\pi^-)$	2
			$\pi^+\pi^-K^+K^-$ $\pi^+\pi^-\rho$	1 0,1
χ	3554		$\gamma\psi$	16
			$\pi^+\pi^-K^+K^-$	2
			$3(\pi^+\pi^-)$ etc,etc.	1

(à suivre)

(suite)

ψ	3686	0,2	$e^+e^-, \mu^+\mu^-$ hadrons	2 98
ψ	3770	25	$e^+e^-, D\bar{D}$	
ψ	4030	50	$e^+e^-, \text{hadrons}$	
ψ	4160	75	$e^+e^-, \text{hadrons}$	
ψ	4415	40	$e^+e^-, \text{hadrons}$	
T	9460	0,04	$\mu^+\mu^-$ e^+e^-	3 3
T'	9993	0,03	e^+e^- $\mu^+\mu^-$ $T(9460)\pi\pi$	2 vu 30
T''	10322	?	e^+e^-	vu
T'''	10547	20	e^+e^-	vu
K^*	892	50	$K\pi$ $K\gamma$ $K\pi\pi$	~ 100
Q_1	1270	90	$K\rho$ $K^*\pi$ $K\omega$ $K\varepsilon$ $\kappa\pi$	42 16 11 3 28
κ	1350	250	$K\pi$	vu
Q_2	1414	180	$K^*\pi$ $K\rho, K\varepsilon, K\omega$	95 5
K^*	1434	100	$K\pi$ $K^*\pi$ $K^*\pi\pi$ $K\rho, K\omega, K\eta$	45 25 13 13
L	1770	200	$K^*(1430)\pi$ $K^*(892)\pi, Kf$	dominant vus
K^*	1775	140	$K\pi\pi, K^*\pi, K\pi$	importants
D^{*+}	2010	< 2	$D^0\pi,$ $D^+\pi, D^+\gamma$	64 36
D^{*0}	2007	< 5	$D^0\pi, D^0\gamma$	50/50
F^*	2140	?	?	

2. BARYONS (FERMIONS)

N	1470	200	N π	60
			N η	18
			N $\pi\pi$	25
N	1520	125	N π	55
			N $\pi\pi$	45
N	1535	100	N π	30
			N η	65
			N $\pi\pi$	5
N	1670	155	N π	45
			N $\pi\pi\dots$	55
N	1688	140	N π	60
			N $\pi\pi$	40
N	1700	150	N π	55
			N $\pi\pi$	30
			ΛK	10
			ΣK	5
N	1700	120	N π	10
			N $\pi\pi\dots$	90
N	1780	160	N π	20
			N $\pi\pi$	50
			$\Sigma K\dots$	10
N	1810	200	N π	20
			N $\pi\pi$	70
			$\Lambda K\dots$	10
N	2190	250	N π	30
N	2200	250	N π	10
N	2650	400	N π	5
N	3030	400	N π	?
Δ	1232	115	N π	100
Δ	1650	140	N π	32
			N $\pi\pi$	65

(à suivre)

(suite)

Δ	1670	200	$N\pi$	15
			$N\pi\pi$	85
Δ	1690	250	$N\pi$	20
			$N\pi\pi$	80
Δ	1890	250	$N\pi$	15
			$N\pi\pi \dots$	85
Δ	1910	220	$N\pi$	20
			$N\pi\pi \dots$	80
Δ	1950	240	$N\pi$	40
			$N\pi\pi \dots$	30
Δ	1960	200	$N\pi$	10
			ΣK	10
Δ	2160	300	$N\pi$?
Δ	2420	300	$N\pi$?
Δ	2850	400	$N\pi$?
Δ	3230	440	$N\pi$?
Λ	1405	40	$\Sigma\pi$	100
Λ	1520	16	$N\bar{K}$	46
			$\Sigma\pi$	42
			$\Lambda\pi\pi \dots$	10
Λ	1670	40	$N\bar{K}$	20
			$\Lambda\eta$	20
			$\Sigma\pi$	50
Λ	1690	60	$N\bar{K}$	25
			$\Sigma\pi$	30
			$\Lambda\pi\pi$	25
Λ	1815	80	$N\bar{K}$	60
			$\Sigma\pi$	10
			$\Sigma(1385)\pi$	10
Λ	1830	95	$N\bar{K}$	10
			$\Sigma\pi$	50

(à suivre)

(suite)

Λ	1860	100	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi$	30 5
Λ	1870	300	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi$	50 ?
Λ	2100	250	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi, \Lambda\eta$	30 15
Λ	2110	200	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi$	20 40
Λ	2350	120	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi$	12 10
Λ	2585	300	$N\bar{K}$?
Σ	1385	40	$\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$	88 12
Σ	1660	100	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi, \Lambda\pi\dots$	30 ?
Σ	1670	50	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi, \Lambda\pi\dots$	10 50
Σ	1750	75	$N\bar{K}$ $\Sigma\eta, \Lambda\pi\dots$	30 60
Σ	1765	120	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi, \Lambda\pi\dots$	40 50
Σ	1915	100	$N\bar{K}$ $\Lambda\pi, \Sigma\pi\dots$	10 20
Σ	1940	220	$N\bar{K}$ $\Lambda\pi, \Sigma\pi\dots$	20 ?
Σ	2030	180	$N\bar{K}$ $\Lambda\pi, \Sigma\pi\dots$	20 40
Σ	2250	100	$N\bar{K}$ $\Lambda\pi, \Sigma\pi\dots$	10 ?
Σ	2455	120	$N\bar{K}$?
Σ	2620	200	$N\bar{K}$?

(à suivre)

(suite)

Ξ	1530	10	$\Xi\pi$	100
Ξ	1820	20	$\bar{K}\Lambda$	45
			$\Xi(1530)\pi$	45
			$\Sigma\bar{K}\dots$	10
Ξ	2030	16	$\Sigma\bar{K}$	80
			$\Lambda\bar{K}$	20
			$\Xi\Pi\dots$?
Ω	1672		$\Lambda_0\bar{K}$	
			$\Xi\pi_0$	
			$\Xi\pi$	

N.B. Cette liste est loin d'être complète ou parfaitement à jour.
 Une nouvelle liste des Propriétés des Particules est publiée tous les deux ans (années paires) par le Particle Data Group dans la revue PHYSICS LETTERS et dans REVIEW OF MODERN PHYSICS; une édition dactylographiée est diffusée par le Service de Documentation du C.E.R.N. à titre gratuit.

REFERENCES

- 1) Hérodote, Histoire, B,109.
- 2) Aristote, Métaphysique (début).
- 3) Les fragments des philosophes grecs avant Socrate qui nous sont parvenus ont été publiés par H. Diels; la dernière édition est celle de Diels-Kranz, Fragmente der Vorsokratiker, Vol. I.II.III(1951). Il en existe plusieurs traductions. Les vies des Philosophes de Diogène Laërce est une autre source importante.
A consulter aussi : T. Gomperz, Der Griechische Denker, J. Burnet, Early Greek Philosophy, B. Farlington, Greek Science.
- 4) Hésiode, Théogonie, 116,20.
- 5a) Werner Heisenberg, Platons Vorstellungen.....(Festschr. E. Preetorius) (Wiesbaden, 1953).
 - b) Naturwissenschaften, 45, 227 (1958).
 - c) Physique et Philosophie (Paris, 1961).
 - d) Der Teil und das Ganze (München, 1969).
 - e) La Nature dans la Physique Contemporaine (Paris, 1962).
 - f) Philosophical Problems of Nuclear Science (London, 1952).
 - g) Schritte über Grenzen (München, 1973).
- 6) Platon, Timée, p. 27 et suiv.
- 7) Aristote, Physiques, DU Ciel, Génération et Corruption, Météorologiques... (pagination d'après E. Bekker).
- 8) Aristote, p. 302a16.
- 9) " p.1041b12.
- 10) Héron d'Alexandrie, Pneumatiques et Automates.
- 11) P. Lemerle, Le Premier Humanisme Byzantin (Paris, 1971, p. 21).
- 12) Avicenne, Le Livre de la Science (Paris, 1955).
- 13) J.B. Dumas, Leçons de Philosophie Chimique (Paris, 1836).
- 14) I. Newton, Naturalis Philosophiæ Principia Mathematica (scholium général).
- 15) Louis Trenchard More, Newton, a Biography (London, 1934).
- 16) I. Newton, Optique (traduction Coste, Paris, 1722).
- 17) G.W. Leibnitz, Nouveaux Essais sur l'Entendement Humain (Paris, 1966, p. 285).

- 18) B. de Fontenelle, Eloge à Guiglielmini.
- 19) G.E. Stahl, Werke. (Vol. II).
- 20) A.L. Lavoisier, Oeuvres (Paris, 1864).
- 21) J. Dalton, New System of Chemical Philosophy (1808).
- 22) J. Perrin, Les Atomes (Paris, 1913).
- 23) R.A. Millikan, Phys. Rev. 33, 81 (1911); Phys. Rev. (N.S.) 1, 218 (1913).
- 24) O.E. Meyer, Die Kinetische Theorie der Gase (1899).
- 25) M. Planck, Verhandl. d. Deutsch. Phys. Gesellsch. 2, 237 (1900).
- 26) P. Drude, Ann. d. Phys. 1, 578 (1900).
- 27) G. Urbain, Les Notions fondamentales d'Elément et d'Atome (Paris, 1925).
- 28) D. Mendéléev, Essai d'une (sic) Système des Eléments (1869).
- 29) H.G.J. Moseley, Phil. Mag. 26, 1024 (1913); 27, 703 (1914).
- 30) J.J. Thomson, Phil. Mag. 44, 293, 310, 318 (1897).
- 31) R.A. Millikan, Electrons (positive and negative) (Chicago, 1935).
- 32) J.J. Thomson, Phil. Mag. 6, 673 (1903) 7, 237 (1904).
- 33) J. Perrin, Rev. Scientifique 15, 449 (1901).
- 34) H. Nagaoka, Bull. Math. Phys. Soc. (Tokyo) 2, 140 (1904).
- 35) C.G. Barkla, Phil. Mag. 11, 812 (1906); 17, 739 (1909); 22, 396 (1911).
- 36) J.A. Crowther, Proc. Roy. Soc. A84, 442 (1910).
- 37) W. Wilson, Proc. Roy. Soc. A84, 612 (1910).
- 38) H. Geiger, E. Marsden, Proc. Roy. Soc. A82, 495 (1909); Phil. Mag. 25
604 (1913); Sitzungsber. Wien. Akad. Wiss. Naturwiss Klasse Abt. IIa, 121
2361 (1912).
H. Geiger, Proc. Roy. Soc. A83, 492 (1912).
- 39) E. Rutherford, The Background to Modern Science.
- 40) Lettre à Bragg (11 Février 1911).
- 41) E. Rutherford, Phil. Mag. 21, 669 (1911).
- 42) J. Chadwick, Phil. Mag. 40, 734 (1920).
- 43) L. Rosenfeld, N. Bohr: On the constitution of Atoms and Molecules
(with an Introduction by....) Copenhagen (1963).
- 44) C.G. Darwin, N. Bohr and the development of Physics (London 1955).
- 45) A. van den Broek, Physical. Z. 14. 33(1913) et N. Bohr, Conférence
Nobel (1922); Proc. Phys. Soc. 78, 1083 (1961) et H. Moseley, Nature
92, 554 (1912/13).

- 46) H. Moseley, Lettre à N. Bohr (16 Nov. 1913).
- 47) G. de Hevesy, Naturwiss. 11,604 (1923).
- 48) G. Nicholson, Month. Not. Roy. Astron. Soc. 72,679 (1912).
- 49) N. Bohr, Proc. Phys. Soc. 78, 1083 (1961).
- 50) J.J. Thomson, Phil. Mag. 13, 561(1907)
- 51) H.G.J. Moseley, Phil. Mag. 26, 1024(1913); 27, 703(1914).
- 52) E. Goldstein, Berlin, Sitzungsber. 39, 651(1886).
- 53) F.W. Aston, Mass Spectra and Isotops (London, 1933)
- 54) E. Rutherford, Kelvin Lecture (Mai 1922).
- 55) C.T.R. Wilson, Proc. Roy. Soc. A85, 285(1911)
- 56) M. Planck, Verhandl. deutsch. Phys. Geselsch. 2, 202(1900).
- 57) A. Einstein, Ann.d.Phys. 17, 811(1905); 22, 180(1907).
- 58) A. Compton, Phys. Rev. 21,207,483(1923)
- 59) G.N. Lewis, Nature 118,874(1926).
- 60) C.G. Davisson, C.Kunsmann, Phys. Rev. 22, 243(1923)
- 61) E.G. Dumond, Nature 118, 336(1926).
- 62) W. Elsasser, Naturwiss.13,711(1925).
- 63) J.C. Davisson, L.H. Germer, Phys.Rev. 30, 705(1927); Nature 119, 558
1927); Proc. Nat. Acad. Sci. 14,317,619(1927).
- 64) G.P. Thomson, A. Reid, Nature 119, 890(1927).
G.P. Thomson, Proc. Roy. Soc. A117, 600(1928) etc.
- 65) M. Ponte, C.R. 188, 244(1929).
- 66) E. Rupp, Naturwiss. 16, 656(1928); Ann.d.Phys. 85,891(1928) etc.
- 67) E. Uhlenbeck, S. Goudsmit, Naturwiss.13, 953(1925); Nature 117,
264(1926).
- 68) W. Pauli, Z.f;Phys. 31, 765(1925); Conférence Nobel (1945).
- 69) A.S Eve, Rutherford. (Cambridge, 1939).
- 70) I.Curie, F. Joliot, C.R.198 254(1934).
- 71) W. Nernst, Theoretische Chemie(Stuggart, 1903)
- 72) E. Rutherford, Proc.Roy.Soc. A97,396(1920)
- 73) J.L. Classon, Phil. Mag. 42, 596(1921).
E. Rutherford, J. Chadwick, Proc. Cambr. Phil. Soc. 25, 186(1929).
- 74) W. Bothe, H. Becker, Z.f.Phys. 66, 289,421(1930); Naturwiss. 19,753
(1931); 20,349(1932).

- 75) Plusieurs notes aux C.R. (1932).
- 76) J. Chadwick, Nature 129, 312(1932); Proc. Roy. Soc. A 136,692(1932).
- 77) O. Hahn, F. Strassmann, Naturwiss. 27, 11, 89 (1939).
- 78) C.D. Anderson, Science 76, 238 (1932); Phys. Rev. 43, 381, 491 (1933).
- 79) P. Blackett, G. Occhialini, Proc. Roy. Soc. A 139, 699 (1933).
- 80) F. Joliot, C.R. 197, 1622 (1933) etc.
- 81) P.A.M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics (Oxford, 1930).
- 82) Cité par J/ Mehra, The golden Age of Theoretical Physics (Univ. of Texas, Febr. 1972).
- 83) H. Weyl, Group Theory and Quantum Mechanics (N.Y. 1931).
- 84) P.A.M. Dirac, Proc. Roy. Soc. A 133, 60 (1931).
- 85) W. Heitler, The Quantum Theory of Radiation (Oxford, 1960).
- 86) R.P. Feynman, Quantum Electrodynamics (N.Y. 1961).
- 87) W. Heisenberg, Z.f. Phys. 77, 1 (1932) ; 78, 156 (1932); 80,587(1933).
- 88) E. Majorana, Z.f. Phys. 82, 137 (1933).
- 89) H.A. Bethe, Rev. Mod. Phys. 9, 69 (1937).
- 90) E. Fermi, Nuovo Cim. 11, 1 (1934); Z. f. Phys. 88 ; 161 (1934).
- 91) H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Japan 17,48 (1935).
- 92) H.A. Bethe, R.F. Bacher, Rev. Mod. Phys. 8, 186 (1936).
- 93) R. Gurney, Proc. Roy. Soc. A 109 , 540 (1925).
- 94) J. Solomon, Electrons, Protons, Neutrinos (Paris, 1939).
- 95) C.-D. Ellis, W.A. Wooster, Proc. Roy. Soc. A 117, 109 (1927) .
L. Meitner, W. Orthman, Z.f. Phys. 60, 143 (1930).
- 96) W. Pauli, Aufsätze und Vorträge (Berlin, 1933/58) .
- 97) F. Perrin, C.R. 197, 1625 (1933).
- 98) E. Fermi, Ric. Scient. 2 (1933) et réf. 90.
- 99) Réf. 90, 98.
- 100) H.A. Bethe, R.F. Bacher, Rev. Mod. Phys. 8, 189 (1936).
- 101) I. Tamm, Nature 133,981 (1934).
- 102) J. Elster, H. Geitel, Physik Z.1., 11 (1899).
- 103) C.T.R. Wilson, Proc. Cambr. Phil. Soc. 11, 32 (1900).
- 104) A. Gockel, Physik. Z.11, 280 (1910); 12, 595 (1911).
- 105) V.F. Hess, Physik. Z.12, 998 (1911); 13, 1084 (1912); 14,610 (1913).
- 106) M. Kuntze, Z.f; Phys. 83, 10 (1933).
- 107) S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, Phys. Rev. 51,884 (1937).
- 108) " " " Phys. Rev. 54, 88 (1938) .

- 109) J.C. Street, E.C. Stevenson, Phys. Rev. 52, 1003 (1937);
Y. Nishina, M. Takeuki, T. Ishimiya, Phys. Rev. 52 1198 (1937); 55, 585 (1939); 55, 1266 (1939).
- 110) R. Brode, B. Starr, Phys. Rev. 53, 3 (1938).
D.R. Corson, R. Dale, R. Brode, Phys. Rev. 53, 773 (1938).
- 111) L. Leprince-Ringuet, C.R. 211, 382 (1940); Les Rayons Cosmiques (Paris, 1945).
- 112) E.L. Williams, G.E. Roberts, Nature 145, 102 (1940).
- 113) P.A.M. Dirac, Conférence Nobel (1933).
- 114) H. Greinacher, Z. f. Phys. 4, 195 (1921).
- 115) J.D. Cockcroft, E.T.S. Walton, Proc. Roy. Soc. A 136, 619 (1932).
- 116) R.J. van de Graaff, Phys. Rev. 38, 1919 (1931).
- 117) E.O. Lawrence, N.E. Edlefsen, Science 72, 376 (1930).
- 118) E.O. Lawrence, M.S. Livingston, Phys. Rev. 37, 1707 (1931).
- 119) M.S. Livingston, Principles of cyclic Particle Accelerators (Princeton, 1961).
M.S. Livingston, J.P. Blewett, Particle Accelerators (N.Y. 1962)
E. Segré, Nuclei and Particles (N.Y. - Amsterdam, 1965).
E. Persico, E. Ferrari, S.E. Segrè, Principles of Particle Accelerators (N.Y. Amsterdam, 1968).
Ann. Rev. Nucl. Science, Vol. 1, 2, 4, 8, 10, 17, 18, 22.
Progr. Nucl. Phys. Vol: 1, 4, 9.
Reports on Progr. in Phys. Vol : 19.
- 120) G. Wentzel, Rev. Mod. Phys. 19, 1 (1947).
- 121) V. Mukherji, Indian, J. Hist, Sci. 6, 75 (1971); Archiv, Hist. Ex. Sci. 13, 27 (1974).
- 122) M. Schein, W.P. Jesse, E.O. Willan, Phys. Rev. 59, 615 (1941).
- 123) P. Freier, E.J. Lofgren, E.P. Ney, R. Oppenheimer, Phys. Rev. 74, 1818 (1948).
- 124) H.L. Bradt, B. Peters, Phys. Rev. 74, 1828 (1948).
- 125) " " " " 76, 156 (1949).
- 126) " " " " 77, 54 (1950).
- 127) Pour une revue récente voir : M.M. Shapiro, R. Silberberg, Ann. Rev. Nucl. Sci. 20, 323 (1970).
- 128) B.M. Dauber (édit.) Isotopic Composition of the primary Cosmic Radiation (Proceedings of a Symposium held in Lungbey, Danemark, March 1971).

- 129) W.B.Fretter, Phys.Rev.70,821 (1946).
- 130) W.E. Hazen, Phys.Rev.67, 269 (1945).
- 131) R.B. Brode, Rev.Mod.Phys.21,37 (1949).
- 132) T.C. Merkle, E.L. Goldwasser, R.B. Brode, Phys.Rev.79,926 (1950).
- 133) H.A. Bethe, Phys.Rev.70,821(1946).
- 134) R.F. Christy, S. Kusaka, Phys.Rev.59,414 (1941).
- 135) R.E. Lapp, Phys.Rev.69,321 (1946).
- 136) S. Tomonaga, G. Araki, Phys.Rev.56,90 (1940).
- 137) S. Sakata, T. Inoue, Progr.Theor.Phys.(Japon)1,143(1946).
- 138) M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, Phys.Rev.68,232 (1945).
- 139) " " " " " 71,209 (1947).
- 140) M. Blau, H. Wambacher, Sitz.Akad.Wiss.Wien,141,617(1932).
" " " " " " 146,623(1937).
" " Nature,140,585 (1937).
- 141) S.Kinoshita, Proc.Roy.Soc.(London)83,432 (1910).
M. Reingamun, Physik.Z.12,1096 (1911).
M. Shapiro, Rev.Mod.Phys.13,58 (1941) donne une revue.
- 142) Selected Papers of C.F. Powell, edited by E.H.S. Burhup, W.O. Lock,
M.G. Menon, Amsterdam-London(1972).
- 143) C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, Nature, 160, 453,
486 (1947).
- 144) A.I. Alichanian, A.I. Alichanov, A.Wiessenberg, J.Phys.(URSS)11,
97, 199 (1947). ; J.Exp.Theor.Phys.(URSS)18,301 (1948).
- 145) A.I. Alichanian, A.I. Alichanov, V.M. Morosov, A.V. Khrimjan, Dokl.
Akad.Nauk. (SSSR)61,35 (1948).
A.I. Alichanian, A.I. Alichanov Nat.163, 761 (1969).
- 146) P.Auger, J. Daudin, A. Fréon, R. Maze, C.R.226,169 (1948).
- 147) E.W. Cowan, Science, 108, 534 (1948).
- 148) C.F. Powell, Edinburgh Conference (Nov. 1949).
- 149) L. Leprince-Ringuet, M. Lhéritier, C.R.219,618 (1944).
- 150) L. Leprince-Ringuet, M. Lhéritier, R. Richard-Foy, C.R. 221 465
(1945) ; J. Phys.Rad.7,65 (1946).
- 151) J. Daudin, Ann.Phys.(Paris)(11),19,110(1944).
- 152) L.Janossy, F.D. Rochester, D. Broadbent, Nature,155,142 (1945).
- 153) G.D. Rochester, C.C. Butler, Nature, 160, 585 (1947).
- 154) C.C. Butler, W.G.V. Rosser, K.H. Barker, Proc.Phys.Soc.A63,145
(1950).

- 155) K.H. Barker C.C. Bulter, Proc. Phys. Soc.A64,4 (1951).
- 156) R. Armenteros, K.H. Barker, C.C. Butler, A. Cachon, A.H. Champman, Nature, 167,501 (1951).
- 157) A.J. Seriff, R.B. Leighton, C. Hsiao, E.W. Cowan, C.D. Anderson, Phys. Rev.78, 290 (1950).
- 158) C.C. Butler, Progr. in Cosm. Ray Physics (Amsterdam 1952) p.63.
- 159) V.D. Hopper, S.Biswas, Phys.Rev.80,1099 (1950).
- 160) R.Brown, U. Camerini, P.H. Fowler, H. Muirhead, C.F. Powell, D.M. Ritson, Nature,163,82(1949).
- 161) J.B. Harding, Phil.Mag.41,405(1950).
- 162) P.H. Fowler, M.G.K. Menon, C.F. Powell, O. Rochat, Phil.Mag.42, 1040 (1951).
- 163) G. Baroni, C. Castagnoli, G. Cortini, C. Franzinetti, A. Manfredini, Proc.Roy.Soc.A221,Discussion meeting,1954.
- 164) G. Belliboni, B.Sechi, B.Vitale, Suppl.Nuovo Cimento,12,195(1954).
- 165) C.O'Ceallaigh, Phil.Mag.42,1032 (1951).
- 166) M.G.K. Menon, C.O'Ceallaigh,Proc.Roy.Soc.A221,294(1954).
- 167) Comptes Rendus du Congrès International sur le Rayonnement Cosmique. Bagnères de Bigorre (Juillet 1953).
- 168) Annual Rev. Nucl. Science (éditée depuis 1953).
- 169) Progress in Cosmic Ray and Elementary Particle Physics (édité depuis 1952).
- 170) Progress in Nuclear Physics (édité depuis 1950).
- 171) Reports on Progress in Physics (The Royal Society...). Surtout depuis 1948.
- 172) E.P. Hincks, B. Pontecorvo, Phys.Rev.73,257 (1948).
- 173) I. Barbour, Phys. Rev.76, 320 (1949); 78,518 (1950).
- 174) C. Franzinetti, Phil.Mag.41,86 (1950).
- 175) C. Peyrou, A. Lagarrigue, C.R. 228,312 (1949).
- 176) C. Peyrou, A. Lagarrigue, F. Bousser, C.R. 230, 1058 (1950).
- 177) W.H. Barkas, W. Birnbaum, F.M. Smith, Phys.Rev.101,778 (1955).
G. Feinberg, L.M. Lederman, Ann.Rev.Nucl.Sci.13, 431 (1963).
- 178) R.B. Leighton, C.D. Anderson, A.J. Seriff, Phys.Rev.75,1432(1949).
R.W. Thompson, Phys.Rev.74,490(1948).
J. Steinberger, Phys.Rev.75,1136(1949).
J.H. Davies,W.O. Lock, H. Muirhead,Phil.Mag.40,1250 (1949).
H. Bramson, W. Havens, Phys.Rev.83,861 (1951).
R. Levi-Setti, G. Tomasini, Nuovo Cimento, 8,994 (1951).
R. Sagane, W.L. Gardner, H.W. Hubbard, Phys.Rev.82,557 (1951).
A. Lagarrigue, C. Peyrou, J. Phys.Rad.12,557 (1951).

- 179) Voir réf.172.
- 180) V. W. Hughes, D.W. McColm, K. Ziock, R. Prepost, Phys.Rev.Lett.5, 63 (1960).
- 181) J. Rainwater, Ann.Rev.Nucl.Sci.7,1(1957).
- 182) G. Feinberg, L.G. Lederman, Ann.Rev.Nucl.Sci.13,431(1963).
- 183) G.E. Mazek, A.J. Lazarus, W.K.H. Panofsky, Phys.Rev.103,374(1956).
- 184) C.O'Caellaigh, Phil.Mag.41, 838(1951).
- 185) J.R. Richardson,Phys.Rev.74,1720(1948).
- 186) E.A.Martinelli, W.K.H. Panofsky,Phys.Rev.77,465(1950).
- 187) L.M. Lederman, E.T. Booth, H. Byfield, J. Kessler, Phys.Rev.83, 685 (1951).
- 188) H. Yukawa, S. Sakata, Proc.Phys.Math.Soc. (Japan) 19,1084(1937).
- 189) A.G.Carlson,J.E. Hooper,D.T. King, Phil.Mag.41,701(1950).
B.M. Anand, Proc.Roy.Soc.220,183 (1953).
- 190) R. Bjorklund, W.E. Crandall, B.J. Moyer, H.F.York,Phys.Rev.77, 213 (1950).
- 191) J. Seinberger, W.K.H. Panofsky, J.Steller, Phys.Rev.78,802(1950).
- 192) W.K.H. Panofsky, R.L. Aamodt,J. Hadley,Phys.Rev.81,565(1951).
- 193) R. Durbin, H. Loar, J. Steinberger, Phys.Rev.83,646(1951);
85. 523(1952).
- 194) D. Clark, A. Roberts, R. Wilson, Phys.Rev.83,649(1951) ;
84,581 (1951).
- 195) W.F. Cartwright, C.Richman,M.N. Whitehead, H.A. Wilcox,
Phys.Rev.91,677 (1953).
- 196) C.N. Yang,Phys.Rev.77,242 (1950).
- 197) W. Chinowski, J.Steinberger,Phys.Rev.95,1561(1954).
- 198) R.Feynman,Phys.Today,1,9 (1948).
- 199) M. Gell-Mann,M.K.Watson,Ann.Rev.Nucl.Sci.4,219(1954).
- 200) H.A.Bethe,F.de Hoffmann,Mesons and Fields.Vol.I-II(N.Y.1955).
R.E.Marshak,Meson Physics (N.Y.,Toronto,London,1952).
A.M. Thorndike,Mesons(N.Y.,Toronto,London,1952).
- 201) E.M. Henley,M.A.Ruderman,J.Steingerber,Ann.Rev.Nucl.Sci.3,1 (1953).
- 202) S.J. Lindenbaum,Ann.Rev.Nucl.Sci.7,317(1957).
- 203) E.B.McMillan,J.Peterson,S.White,Science,110,579 (1949).
- 204) L. Leprince-Ringuet, Ann.Rev.Nucl.Sci.3,39(1953).
- 205) C.Dilworth, G.P.S. Occhialini, L. Scarsi, Ann.Rev.Nucl.Sci.4, 271 (1954).
- 206) C. Franzinetti, G. Morpurgo,Suppl.Nuovo Cimento,n°2 (1957).
- 207) M.Gell-Mann, A.H. Rosenfeld,Ann.Rev.Nucl.Sci.7,407(1957).

- 208) H.S. Bridge, H. de Staebler, B. Rossi, B.V. Sreekantan, Nuovo Cimento, 1, 874 (1955).
- 209) H. Courant, Phys. Rev. 99, 282 (1955).
- 210) R. Cester, T.F. Hoang, M.F. Kaplon, G. Yekutieli, Phys. Rev. 103, 1443 (1956).
- 211) D. Keefe, Nuovo Cimento, 4, 412 (1956).
- 212) R.H. Dalitz, Phil. Mag. 66, 710 (1953).
- 213) J. Crussard, M.F. Kaplon, J. Klarman, J.H. Noon, Phys. Rev. 93, 252 (1954).
- 214) B. Grégory, A. Lagarrigue, L. Leprince-Ringuet, F. Muller, Ch. Peyrou, Nuovo Cimento, 2, 292 (1956).
- 215) M.W. Friedlander, D. Keefe, M.G.K. Menon, L. van Rossum, Phil. Mag. 45, 1043 (1954).
- 216) R. Bude, M. Chretien, J. Leitner, N.P. Samios, M. Schwartz, J. Steinberger, Phys. Rev. 103, 1827 (1956).
- 217) V.A.J. van Lint, G.H. Trilling, Phys. Rev. 92, 1089 (1953).
- 218) E.P. George, A.J. Hertz, J.H. Noon, N. Solutseff, Nuovo Cimento, 3, 94 (1956).
- 219) T.L. Aggson, W.B. Fretter, E.W. Friesen, L.F. Hansen, R.G. Kepler, A. Lagarrigue, Phys. Rev. 102, 243 (1956).
Pour une revue générale des résultats sur les K chargés voir
H.S. Bridge, Progr. in Cosmic Ray Physics, 3, 143 (1956).
- 220) K.H. Barker, Proc. Roy. Soc. A 221, 326 (1954).
- 221) W.B. Fretter, M.M. May, M.P. Nakada, Phys. Rev. 89, 168 (1953).
- 222) H.S. Bridge, Ch. Peyrou, B. Rossi, R. Safford, Phys. Rev. 91, 362 (1953).
- 223) D.B. Gayther, Phil. Mag. 45, 570 (1954).
- 224) R.W. Thompson, Progr. in Cosmic Ray Physics, 3, 253 (1956).
- 225) M. Schwartz, J. Steinberger, R. Plano, N. Samios, Nuovo Cimento, 5, 203 (1957).
- 226) M. Gell-Mann, A. Pais, Phys. Rev. 97, 1387 (1956).
- 227) K. Landé, E.T. Both, J. Impeuglia, L.M. Lederman, W. Chinowski, Phys. Rev. 97, 1901 (1956).
- 228) V.A.J. van Lint, G.H. Trilling, réf. 98.
- 229) E.P. George, A.J. Herz, J.H. Noon, N. Solutsev, Réf. 99.
- 230) voir réf. 100.
- 231) R. Armenteros, B. Grégory, A. Hendel, A. Lagarrigue, L. Leprince-Ringuet, F. Muller, Ch. Peyrou, Nuovo Cimento, 4, 520 (1957).
- 232) A.G. Ekspong, G. Goldhaber, Phys. Rev. 102, 1187 (1956).
- 233) R. Armenteros et al. Suppl. Nuovo Cimento, 4, 541 (1956).

- 234) W.H. Barkas, P.H. Barrett, P.Cüer, H.Heckman, F.M. Smith, H.K.Ticho, Phys.Rev.102,583 (1956).
- 235) W.H. Barkas, Ann.Rev.Nucl.Phys.15,67(1965). Revue plus récente.
- 236) A. Bonetti, R.Levi-Setti,M.Panetti,G.Tomasini, Nuovo Cimento,10 345 (1953).
- 237) V.D. Hopper, S.Biswas, Phys.Rev.80,1099(1950).
- 238) R.W. Thompson, H.O. Cohn, R.S. Flum, Phys.Rev.83,175 (1951).
- 239) R.W. Thompson, Progr. in Cosm.Ray Physics, 3,253 (1956).
- 240) M. Gell-Mann, Note non publiée (1953) Suppl.Nuovo Cimento,4,848(1956).
- 241) K. Nishijima, Progr.Theor.Phys. (Japan),12,107(1954); 13,285(1955).
- 242) W.B. Fowler, R.P. Shutt, A.M. Thorndike, W.L. Whitmore, Phys.Rev.91, 1287(1954) ; 93, 861 (1954) ; 98,121 (1955).
- 243) W.D. Walker, Phys.Rev.98,1407 (1955).
W.D. Walker, W. Shephard, Phys.Rev.101, 1810(1956).
- 244) L.W.Alvarez, H. Bradner, P. Falk-Vairant, J. D. Gow, A.H. Rosenfeld, F.T. Solmitz, R.D. Tripp, Nuovo Cimento,5,1026 (1957).
- 245) R. Plano, N. Samios, F. Eisler, J. Steinberger, Nuovo Cimento, 5 216,1700 (1957).
- 246) F. Eisler, R. Plano, N. Samios, J. Steinberger, M. Schwartz, Phys.Rev.110,226 (1958)
- 247) Proceedings of the 1958 Annual Intern.Conf.on High Energy Physics, C.E.R.N.1958, p.161 (rapporté par Kaplon).
- 248) L. Alvarez, Ph.Eberhard, L.M. Good, W. Graziano, H.K. Ticho, S.G. Wojcicki, Phys.Rev. Letters,2,215 (1959).
- 249) L. Jauneau et al. Proc. on the Sienna Intern.Conf.on Elem.Particules (1963), p.4.
- 250) A. Debenedetti, C.M. Carelli, L. Tallone, M. Vigone, Nuovo Cimento,12 952(1954).
- 251) W.B. Fowler, R.P. Shutt, M. Thorndike W.L. Whitmore, Phys.Rev.93, 861(1954).
- 252) W.F. Fry, J. Schneps, G.A. Snow, M.S. Swami, D.C. Wold, Phys.Rev.104, 270(1956).
- 253) R. Armenteros, K.H. Barker, C.C. Butler, A. Cachon, C.M. York, Phil. Mag.43,597(1952).
- 254) C.D. Anderson, E.W. Cowan, R.B. Leighton, V.A.G. van Lint, Phys. Rev. 92,1089 (1953).
- 255) R. Armenteros, B.P. Grégory, A. Lagarrigue, L. Leprince-Ringuet, F. Muller, Ch.Peyrou, Suppl.Nuovo Cimento,12,324 (1954).

- 256) V.E. Barnes et al. Phys.Rev.Letters,12,204(1964).
- 257) Y. Eisenberg, Phys.Rev.96,541(1954).
- 258) W.F. Fry, J. Schneps, M.S. Swami, Nuovo Cimento,2,346(1955).
- 259) L. Alvarez, Phys.Rev.8,702(1973).
- 260) M. Danysz, J. Pniewski, Phil.Mag.44,348(1953).
- 261) L. Thomas, Phys.Rev.54,580 (1938).
- 262) V. Veksler, J. de Phys. (URSS),9,153 (1945).
- 263) E.M. Mac Millan, Phys.Rev.68,143(1945).
- 264) L. Alvarez, Phys.Rev.70,799(1946).
- 265) E. Courant, M.S. Livingston, H. Snyder, Phys.Rev.88,1190(1952).
- 266) D.I. Blokintsev et al. Sov.Phys.USPEKHI,109,82 (1973).
- 267) G. McCusker, D. Miller, Nuovo Cimento,8,289(1951).
- 268) R.W. Thompson, B. Rossi, R.B. Leighton, Proc. of the Rochester Conference (1952).
- 269) Y. Nambu et al. Progr.Theor.Phys.(Japan),6,615,619 (1951).
- 270) K. Aizu, T. Kinoshita, Progr.Theor.Phys.(Japan),6,63 (1951).
- 271) H. Miyazawa, Progr.Theor.Phys.(Japan),6,631(1951).
- 272) S. Oneda, Progr.Theor.Phys.(Japan),6,633(1951).
- 273) A. Pais, Phys.Rev.86,663(1952).
- 274) J.R. Oppenheimer, réf. 268; E.P. Wigner, Proc.Amer.Phil.Soc.93,521(1949).
- 275) E.C. G. Stueckelberg, Helv.Phys.Acta,11,299(1939).
- 276) D.Lal, Y.Pal, B.Peters, Proc.Ind.Acad.Sci,38,398(1953).
- 277) A. Debenedetti, C.M. Carelli, L. Tallone, M.Vignone, Nuovo Cimento,12,369,466(1954).
- 278) R.W. Thompson et al. Phys. Rev.95,1576 (1954).
- 279) C. Dahanayake et al., Phil.Mag.45,855(1954).
- 280) J. Ballam, D.R. Harris, A.L. Hodson, W.Martin, R.R. Rau, G.T. Reynolds, S.B. Treiman, Phys.Rev.93,1019(1955).
- 281) G.D. James, R.A. Salmeron, Phil.Mag.46,571 (1955).
- 282) G.D. James, Suppl.Nuovo Cimento,9,325(1956).
- 283) W.B. Fowler et al., réf.132.
- 284) K.H. Barker, M.S. Coates, B.R. French, réf.163,p.319.
- 285) W.D. Walker, Phys.Rev.98,1047(1955).
- 286) M. Gell-Mann, A.Pais, Phys.Rev.97,1387(1953).
- 287) M. Gell-Mann, Phys.Rev.92,833(1953).
- 288) M. Baldo-Ceolin, C.Dilworth, W.Fry, W. Greening, H. Huzita, S.Limentani, A. Sichirollo, Nuovo Cimento,6,130(1957).
- 289) R.Ammar, J. Friedman, R. Levi-Setti, V. Telegdi, Nuovo Cimento,5,1801,(1957).
- 290) A. Pais, O. Piccioni, Phys.Rev.100,1487(1955).

- 291) F. Muller, W. Birge, W. Fowler, R. H. Good, W. Hirsch, R. P. Matsen, L. Oswald, W. Powell, H. S. White, O. Piccioni, Phys. Rev. Lett. 4, 418 (1960); Phys. Rev. 124, 1223 (1961).
- 292) P. K. Kabir, The CP Puzzle. Strange decays of neutral kaons (London, N. Y. 1968).
- 293) H. Lipkin, Quantum Mechanics (Amsterdam, London, N. Y., 1973).
- 294) E. J. Konopinski, G. E. Uhlenbeck, Phys. Rev. 48, 7 (1935).
- 295) H. A. Bethe, R. F. Bacher, Rev. Mod. Phys. 8, 82 (1936).
- 296) R. G. Sachs, Nuclear Theory, (Cambridge, Mass. 1953).
- 297) B. Cassen, E. U. Condon, Phys. Rev. 50, 846 (1936).
- 298) L. A. Young, Phys. Rev. 47, 972 (1935).
- 299) G. Breit, E. U. Condon, R. D. Present, Phys. Rev. 50, 825 (1936).
- 300) G. Breit, E. Feenberg, Phys. Rev. 50, 850 (1936).
- 301) G. Gamow, E. Teller, Phys. Rev. 51, 289 (1937).
- 302) J. R. Oppenheimer, R. Serber, Phys. Rev. 51, 1113 (1937).
- 303) H. Yukawa, S. Sakata, Proc. Phys. Math. Soc. Japan, 19, 1084 (1937); Phys. Rev. 51, 677 (1937).
- 304) H. Fröhlich, W. Heitler, N. Kemmer, Proc. Roy. Soc. A 166, 154 (1938).
- 305) N. Kemmer, Proc. Camb. Phil. Soc. 34, 354 (1938).
- 306) H. J. Bhabha, Nature, 141, 117 (1938).
- 307) H. Yukawa, Conférence Nobel (1949) : Rev. Mod. Phys. 21, 474 (1949).
- 308) G. D. Camp, Phys. Rev. 51, 1046 (1937).
- 309) R. Serber, Phys. Rev. 56, 1065 (1939).
- 310) G. Wentzel, Helv. Phys. Acta, 13, 269 (1940); 14, 633 (1941).
- 311) W. Heitler, S. T. Ma, Proc. Roy. Soc. A 176, 368 (1940).
- 312) H. J. Bhabha, Proc. Ind. Acad. Sci. All., 347, 468 (1940); Phys. Rev. 59, 100 (1941).
- 313) W. Pauli, S. M. Dancoff, Phys. Rev. 61, 387 (1942).
- 314) V. Weisskopf, Phys. Rev. 72, 510 (1947).
- 315) G. Wentzel, Rev. Mod. Phys. 19, 1 (1947).
- 316) M. Gell-Mann, Scient. Amer. juillet 1957, p. 72
- 317) D. C. Peaslee, Phys. Rev. 86, 127 (1952).
- 318) S. B. Treiman, G. T. Reynolds, A. L. Hodson, Phys. Rev. 97, 244 (1955).
- 319) A. Pais, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 40, 484 (1954).
- 320) M. Gell-Mann, Phys. Rev. 92, 833 (1953).
- 321) M. Gell-Mann, A. Rosenfeld, Ann. Rev. Nucl. Sci., 7, 407 (1957).
- 322) R. Dalitz, Phil. Mag. 44, 1068 (1953) et réf. 46; Phys. Rev. 94, 1046 (1954).
- 323) M. Gardner, L'Univers ambidextre (Paris 1968).
- 324) T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956).

- 325) F. Dyson, Scient.American(Sept.1958).
- 326) C.S. Wu, E.Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hopes, R.P. Hodson, Phys.Rev.
105,1413(1957).
- 327) R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich, Phys.Rev.105,1415(1957).
- 328) J.I. Friedman, V.L. Telegdi, Phys.Rev.105,1681(1957).
- 329) L.D. Landau, JETP.32,405(1957).
- 330) H. Weyl,Z.f.Physik,56,330(1929).
- 331) A. Salam, Nuovo Cimento,5,29(1957).
- 332) L.D. Landau, JETP,32,407(1957).
- 333) T.D. Lee, C.N. Yang,Phys.Rev.105,1671(1957).
- 334) G. Puppi, Nuovo Cimento, 5,587(1948).
- 335) O. Klein,Nature,161,897(1948).
- 336) J. Tiomno, J.A. Wheeler, Rev.Mod.Phys.,21,144(1949).
T.D. Lee, M. Rosenbluth,C.N. Yang,Phys.Rev.75,905(1949).
- 337) N. Dallaporta, Nuovo Cimento,1962 (1958).
- 338) E.C.G. Sudarshan, R.E. Marshak,Proc.Padova Intern.Conf.(1957).
- 339) R.P. Feynman, M. Gell-Mann,Phys.Rev.109,193 (1958).
- 340) T. Fazzini, G. Fidecaro,A.V. Merrison,H. Paul,A.V. Tollstrup,
Phys.Rev.Letters,1,247(1958).
- 341) E. Impeuglia, R.Piano,A.Prodell,N.Samios,M.Schwartz,J.Steinberger,
Phys.Rev.Letters,1,249(1958).
- 342) M.Bardon,K.Lande,L.M.Lederman,W.Chinofski,Ann.Phys.N.Y.5,156(1958).
- 343) D. Luers, I.S.Mittra,W.J.Willis,S.S.Yamamoto,Phys.Rev.Letters,7,255
(1961) ; Phys.Rev.133,B1276(1964).
- 344) D.Neagu,E.O.Okonov, N.I. Petrov, A.M. Rosanova, B.A. Rusakon, Phys.
Rev.Letters,6,552(1961).
- 345) J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch,R. Turlay, Phys.Rev.Letters
13,138(1964).
- 346) N. Cabibbo, Phys.Rev.Letters,10,531(1963).
- 347) A.S. Eve, Rutherford (Cambridge,1939).
- 348) P.A.M. Dirac, Proc.Roy.Soc.A126,360(1930) : A133,60(1931).
- 349) N. Arley, Physica,12,177(1946).
- 350) E. Fermi, C.N. Yang,Phys.Rev.76,1739(1949).
- 351) E. Hayward, Phys.Rev.72,937(1947).
H. Bridge, H. Courant,H.de Staebler, B.Rossi, Phys.Rev.95,1101(1954).
E.Amaldi, C.Castagnoli,G.Cortini,C.Franzinetti,A.Manfredini,
Nuovo Cimento,1,492 (1955).
- 352) O.Chamberlain et al.Phys.Rev.100,947(1955);101,909(1956);102,921(1956).
- 353) O.Chamberlain et al.Nature,177,11(1956).

- 354) B. Cork, C.R. Lambertson, O. Piccioni, W.A. Wentzel, Phys.Rev.104, 1193(1956).
- 355) L.E. Agnew, T. Elioff, W.B. Fowler, L. Gilly, R. Lander, L. Oswald, W.Powell, E. Segrè, H. Steiner, H. White, C.Wiegand, T. Ypsilantis, Phys.Rev.110,994(1958).
- 356) E. Segrè, Ann.Rev.Nucl.Sci.8,127(1958).
- 357) R. Armenteros, B. French dans E.H.S. Burhop, High Energy Physics, Vol.IV,p.237(N.Y., London,1969).
- 358) D.E. Dorfan, J. Eades, L.M. Lederman, W.Lee, S.C.C.Ting, Phys.Rev. Letters,14,1003 (1965).
- 359) Y.M. Antipov, S.P. Denisov, S.V. Donskov, Y.P. Gorin,V.A. Lapshin, A.A.Lebedev, A.G. Morozov, A.I.Petrushkin, Y.D.Prokoshkin, E.A. Razu- raev, V.I. RYkalin, R.S. Shovalov, V.I. Soljanick, D.A. Stoyanova, N. K. Vichevski, F.A. Yetch, A.M. Zajtzev, G.D. Zhilckentova, Nucl.Phys.B31,235(1971).
- 360) P.A.M. Dirac, Proc.Roy.Soc.A.117,610(1928).
- 361) N.F.Mott, Proc.Roy.Soc.,A124,425(1929).
- 362) E.Guth, Anz.Akad.Wiss.Wien,Math.Naturwiss.Kl.24,299(1934).
- 363) W.W. Havens, I.I. Rabi,L.J. Rainwater, Phys.Rev.72?634(1947).
- 364) E. Fermi, L.Marshall, Phys.Rev.72,1139 (1947).
- 365) M.E. Rose, Phys.Rev.73,279 (1948).
- 366) M.N. Rosenbluth, Phys.Rev.79,615 (1950).
- 367) R. Hofstadter, Conférence Nobel (1961) ; Nuclear and Nucleon Structure (N.Y.1963); Ann.Rev.Nucl.Sci.7,231 (1957).
- 368) R.W. McAllister, R. Hofstadter, Phys.Rev.102,851(1956).
- 369) H. Cheng, T.T.Wu, Proc.1971 Intern.Symp.on Electron and Photon Interactions at High Energies. Cornell Univ. August 23-27.
- 370) E.E.Chambers, R. Hofstadter, Phys.Rev.103,1454 (1956).
- 371) D.R. Yennie, M.M. Lévy, D.G. Ravenhall, Rev.Mod.Phys.29,144 (1957).
- 372) R.M. Littauer, H.F. Schopper, R.R. Wilson, Phys.Rev.Letters,7,144 (1961).
- 373) D. Olson, H.F. Schopper, R.R. Wilson, Phys.Rev.Letters,6,286 (1961).
- 374) M. Gourdin, Phys.Rep.11C,n°2(1974).
- 375) Y. Nambu, Phys.Rev.106,1366 (1957).
- 376) W.R. Fraser, J.R. Fulco, Phys.Rev.Letters,2,365(1959).
- 377) J. Sakurai, Phys.Rev.Letters,7,355 (1961).
- 378) H.J. Bhabha, Proc.Roy.Soc.A173,384(1939).
- 379) H.J. Bhabha, Proc.Ind.Acad.Sci.11,347 (1940).

- 380) W. Heitler, Nature,145,29 (1940).
- 381) G. Wentzel, Helv.Phys.Acta,15,635(1942).
- 382) W. Pauli, S.M. Dancoff, Phys.Rev.62,85(1942).
- 383) H.J. Bhabha, Rev.Mod.Phys.21,451 (1949).
- 384) I. Ya Pomeranchuk, Sov.Phys.JETP,3,306(1956) ; 7,499 (1958).
- 385) H. Cheng,T.T.Wu, Phys.Rev.Letters,24, 1456 (1970).
- 386) K.A.Ter Martirosyan, A.I. Lendel, JETP Letters, 11,45 (1970).
A. Tavkhelidge, XVth Intern.Conf.on High Energy Physics (Kiev,1970).
- 387) D. Morrison, Hawai Topical Conf. in Particle Physics (1973).
- 388) H.L. Anderson, E. Fermi, E. Long, R. Martin, D.E. Nagle, Phys.Rev.85, 934(1952).
H.L. Anderson, E. Fermi, D.E. Nagle, G. Yodh, Phys.Rev.86,793 (1952).
- 389) K.A. Brueckner, Phys.Rev.86,106 (1952).
- 390) H.L. Anderson, E. Fermi, R. Martin, D.E. Nagle, Phys.Rev.91,155 (1953).
E. Fermi, M. Glicksman, R. Martin, D.E. Nagle, Phys.Rev.92,161(1953).
- 391) E. Fermi, N. Metropolis, E.F. Alei, Phys.Rev.95,1581(1954).
- 392) S.J. Lindenbaum, Luke C.L. Yuan, Phys.Rev.92,1578 (1953) ; 93, 917 (1954) ; 100, 306 (1955).
- 393) S.J. Lindenbaum, Luke C.L. Yuan, Phys.Rev.100,306(1955).
- 394) U. Kruse, H.L. Anderson, W. Davidon, M. Glicksman, Phys.Rev.98,1188 (1955).
- 395) F. De Hoffmann, N. Metropolis, E.F. Alei, H. Bethe, Phys.Rev.95, 1586 (1954).
- 396) A. Ignatenko, A. Muchin, E. Oserov, B. Pontecorvo, Dokl.Akad.Nauk. SSSR,103,45 (1955).
- 397) Mentionné par R.B. Leighton, S.D. Wanless, W.L. Alford, Phys.Rev.83, 843 (1951).
- 398) J.J. Sakurai, Annals of Physics, USA,11,1 (1960).
- 399) M.H. Alston, L. Ali, Ph. Eberhard, M.L. Good, W. Graziano, H.K. Tycho, S.J. Wosjicki, Phys.Rev.Letters,5,520 (1960).
- 400) M. Gell-Mann, Phys.Rev.106,1296 (1957).
- 401) A.R. Erwin, R.March,W.D.Walder,E.West,Phys.Rev.Letters,6,628(1961).
- 402) G.B. Chadwick, W.T. Davies, M. Derrick, C.J.B. Hawkins, J.H. Mulvey, R. Radojicic, C.A. Wilkinson, M. Cresti, S. Limentani, R. Santagelo, Phys.Rev.Letters,10,62 (1963).
- 403) F.J. Lyson, Phys.Rev.99,1037 (1955).
- 404) G. Takeda, Phys.Rev.100, 440 (1955).

- 405) B.C. Maglic, L. Alvarez, A.H. Rosenfeld, M.L. Stevenson, Phys.Rev. Lett.7,178(1961).
- 406) C.Alf, D. Berley, N. Colley, U. Gelfand, D. Nauenberg, J. Muller, J. Schultz, J. Steinberger, TH.H. Tan, H. Brugger, P. Kramer, R. Plano, Phys.Rev.Letters,9,322 (1962).
- 407) A. Pevsner, R. Kraemer, M. Nussbaum, C. Richardson, P. Schlein, R. Strand, T. Toohig, M. Block, A. Engler, R. Cesarolli, C. Metzger, Phys.Rev.Letters,7,421 (1961).
- 408) G.F. Chew, M. Gell-Mann, A.H. Rosenfeld, Scientific American, (1964) p.74.
- 409) T. Regge, Nuovo Cimento,14, 951 (1959); 18,947 (1960).
A. Bottino, A.M. Longoni, T. Regge, Nuovo Cimento,23, 954 (1962).
- 410) S.C.Frautschi, Regge Poles and S-Matrix Theory (N.Y. Amsterdam 1963).
- 411) R. Omnès, Ann.Rev.Nucl.Sci.16,263 (1966).
- 412) V. Barger, Rev.Mod.Phys.40,129 (1968).
- 413) G.E. Hite, Rev.Mod.Phys.41,669 (1969).
- 414) M.Gell-Mann, Y.Ne"eman, The Eightfold Way (N.Y. Amsterdam, 1964).
- 415) G.F. Chew, Physics Today,17, 30 (1964) : Science,161,762 (1968).
- 416) R. Hagedorn, Suppl.Nuovo Cimento,3,147 (1965) : 6,311 (1968).
R. Hagedorn, J.Ranft, Suppl.Nuovo Cimento,6,169 (1968).
R. Hagedorn, Nuovo Cimento,56A,1027(1968); Nucl.Phys.24B,93(1970).
- 417) G.F. Chew, Science,161,762 (1968).
- 418) W. Heisenberg, Introduction to the Unified Field Theory of Elementary Particles (N.Y.,1966).
- 419) G.F. Chew,Physics Today, 23,(10),23 (1970).
- 420) E. Fermi, C.N. Yang, Phys.Rev.76,1739 (1949).
- 421) S. Sakata, Progr.Theor.Phys.(Japon), 16,686 (1956).
- 422) M. Gell-Mann, Phys.Rev.Lett.8,214 (1964).
- 423) G. Zweig, Rapports CERN, TH.N°401,412 (1964).
- 424) D.B. Lichtenberg, Unitary Symmetry and Elementary Particles, (N.Y., London, 1970).
- 425) J.J.J. Kokkedee, The Quark Model (N.Y.,1969).
- 426) J. Nash, Phys.Rev.Letters,32,818 (1974) ainsi que l'article de revue de L.G. Landsberg, Soviet Physics USPEKHI,16,251 (1973).
- 427) H. Bacry, J. Nuyts, L. van Hove, Phys.Letters,9,279 (1964) Nuovo Cimento,35,510(1965).

- L. van Hove, dans Preludes in Theoretical Physics (édit.A. Salit, H. Feshbach, L. van Hove, Amsterdam, 1966).
- M.Y. Han, Y. Nambu, Phys.Rev.139,B1006 (1965) ; D10,674 (1974).
- 428) P. Tarjanne, V.L. Teplitz, Phys.Rev.Letters,11,447(1963)
- Y. Hara, Phys.Rev.134,B701(1964).
- B.J. Björken, S.L. Glashow, Phys.Letters,11,255(1964).
- D.Amati, H.Bacry, J.Nuyts, J.Prentki, Phys.Letters,11,190(1964)
- Nuovo Cimento,34,1732 (1964).
- N.Cabibbo, L.Maiani, G.Preparata, Phys.Letters,25B,132 (1957).
- 429) S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L.Maiani, Phys.Rev.D2,1285(1970).
- 430) H. Fritzsche, M.Gell-Mann, Proc.Intern.Conf.on Duality and Symmetry in Hadron Physics Edit.E.Gotsman, Weizmann Science Press, 1971).
- M.Gell-Mann, Schladming Lecture Notes(1972); CERN preprint TH. 1543 (1972).
- 431) V. Weisskopf, Physics Today,16,(6),26(1963); Science,149,1181 (1965) ; Scientific American,218,(5),15(1958).
- S.F. Tuan, Physics Today,21,(1),31 (1968).
- 432) G. Feinberg, Phys.Rev.159,1089(1967).
- 433) Voir p.ex. Physics Today,22,(12),47(1969).
- 434) J.D.Elder, Physics Today,23,(10),15(1970).
- 435) S.L. Brown, Physics Today,22,(12),50(1969).
- 436) S. Tanaka, Progr.Theoret.Phys. (Japon), 23,171(1960).
- O.M.P. Bilaniuk, V.K. Deshpande, E.C.G. Sudarshan, Am.J.Phys.30,718 (1962) et O.M. Bilaniuk, E.C.G. Sudarshan, Physics Today, 22 (5) 43, (1969).
- 437) A. Sommerfeld, K.Akad.Wat.Amsterdam Proc.8,346,(1904).
- 438) N.Fleury, J. Leite Lopes, Fundamenta Scientiae n°12 (Université L. Pasteur, Strasbourg).
- 439) A.J. Leipuner, Proc.Cambr.Phil.Soc.32,301(1936).
- 440) H.R.Crane, L. Halpern, Phys.Rev.53,789 (1938); 56,232 (1939).
- 441) L.M. Langer, R.J.D. Moffat, Phys.Rev.88,689(1952).
- 442) K.E.Bergvist, Nucl.Phys.B39,317 (1972).
- 443) W.H. Furry, Phys.Rev.54,56 (1937).
- 444) H. Primakoff, Phys.Rev.85,888 (1952).
- 445) C.L. Cowan, F.B. Harrison, L.M. Langer, F. Reines, Nuovo Cimento 3 649 (1956).
- J.A. McCarthy, Phys.Rev.97,1234 (1955).
- M.Awschalom, Phys.Rev.101,1041 (1956).

- 446) R. Davis, Phys.Rev.97,766 (1955).
- 447) B. Pontecorvo, Chalk River Lab.Report PD-205 (1946).
- 448) J.S. Allen, The Neutrino (Princeton, 1958).
- 449) F. Reines, C.L. Cowan, Phys.Rev.90,492 (1953).
C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, E.C. Anderson, F.N. Hayes, Phys.Rev.90,493 (1953).
F. Reines, C.L. Cowan, Phys. Rev.92,830 (1953).
- 450) C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, A.D.McGuire, Science, 124,103 (1956).
- 451) F. Reinez, C.L. Cowan, Phys.Rev.113,273 (1959).
- 452) G. Culligan, S.G.F. Frank, J.C. Kluyver, J.R. Holt, Nature,180, 751 (1957).
- 453) E. Konopinski, H.M. Mahmoud, Phys.Rev.92,1045 (1953).
- 454) G. Bernardini, XII Intern.Conf.on High Energy Physics (Dubna 1964) ; Vol.II,p.37.
- 455) S. Oneda, J.C. Pati, Phys.Rev.Letters, 2,125 (1959).
- 456) B. Pontecorvo, Sov.Phys.JEPT,37,1236 (1960).
- 457) M. Schwartz, Phys.Rev.Letters,4, 306 (1960).
- 458) T.D. Lee, C.N. Yang, Phys.Rev.Letters,4,307 (1960).
- 459) J. Schwinger, Annals of Phys.(U.S.A.),2,407 (1957).
- 460) K. Nishijima, Phys.Rev.108,907 (1957).
- 461) G. Feinberg, Phys.Rev.110,1482 (1958).
R.P. Feynman, M. Gell-Mann, Phys.Rev.109,193 (1958).
T.D. Lee, C.N. Yang, Phys.Rev.108,1611 (1957) ; 119,1410 (1950).
- 462) G. Danby, J.M. Gaillard, K. Goulianos, L.M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger, Phys.Rev.Letters,9,36 (1962).
N. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger, Phys.Rev.Letters,10,260 (1963).
N. Mistry, Ph.D.Thesis. Columbia Univ. (1963).
K. Goulianos, Ph.D.Thesis. Columbia Univ. (1963).
- 463) L.M. Lederman, Scientific American,219(3),60 (1963).
- 464) J.K. Bienlein, A. Böhm, G. von Dardel, H. Faissner, F. Ferrero, J.M. Gaillard, H.J. Gerber, B. Hahn, V. Kaftanor, F. Krienen, M. Reinharz, R.A. Salmeron, P.G. Seiler, A. Staude, J. Stein, H.J. Steiner, Phys.Letters,13,80 (1964).
M.M. Block, H. Burmeister, D.C. Cundy, B. Eiber, C. Franzinetti, J. Keren, R. Mollerud, G. Myatt, M. Nicolic, A. Lecourtois, M. Paty, D.H. Perkins, C.A. Ramm, K.Schultze, H.Sletten, K.Soop, R.Stump,W.Venus,H.Yoshiki, Phys.Letters,12,281 (1964). M. Paty, Rapport CERN 65-12 (1965).

- 465) M. Daum et al. Phys.Letters,76B,126 (1978).
- 466) R. Davis, Phys.Rev.Letters,12,302 (1964).
R. Davis, D.S. Harmer, K.C. Hoffman, Phys.Rev.Letters,20,1205(1968).
R. Davis, L.C. Rogers, V. Radeha, Bull.Am.Phys.Soc.16,631(1971).
- 467) H. Massey, Endeavour,32,86 (1973).
- 468) J.D. Bjorken, E.A. Paschos, Phys.Rev.185,1975 (1969).
- 469) T. Eichten et al. Phys. Letters,46B,281 (1973).
- 470) F.J. Hasert et al. Phys.Letters,46B,138 (1973), Nucl.Phys.B73,1(1974) et Proceedings of the XVII International Conference on High Energy Physics, London, July 1974).
- 471) A. Salam, J.G. Ward, Phys.Letters,13,168 (1964).
S. Weinberg, Phys.Rev.Letters,19,1264 (1967).
- 472) H. Alvensleben, U. Becker, W.K. Bertram, M. Chen, K.J. Cohen, T.M. Knasel, R. Marshall, D.J. Quinn, M. Rohde, G.H. Sanders, H. Schubel, S.C.C.Ting, Phys.Rev.Letters,24,792 (1970).
- 473) Proceedings of the XVIIth International Conference on High Energy Physics (Londres, 1974).
- 474) W. Bartel, B. Dudelzak, H. Krehbiel, J. McElroy, U. Meyer-Bankhoff, W. Schmidt, V. Walter, G. Weber, Phys.Letters,28B,148(1968) et Proceedings of the 1967 Intern.Symp.on Electron and Photon Interactions at High Energies (Stanford, 1967).
- 475) M. Breidenbach, J.I. Friedman, H.W. Kendall, E.D. Bloom, D.H. Coward, H. de Staebler, J. Dress, L.W. Mo, R.E. Taylor, Phys.Rev.Letters,23,935 (1969).
- 476) Voir réf. 473 et Particle Data Group, Review of Particle Properties (LBL.100,1978).
- 477) R. Feynman, Proceedings of the IIIrd High Energy Conference of Stony Brook(N.Y.1970) et Photon-Hadron Interactions (N.Y. 1972).
- 478) R. Feynman, Proceedings of the Vth Hawai Topical Conference in Particle Physics (1973). Phys.Rev.Letters,23,1415 (1969).
- 479) R. Feynman, Science,183,601 (1974).
H.W. Kendall, W.K.H. Panofsky, Scientific American, Fev.1971.
- 480) S.M. Berman, J.D. Bjorken, J.B. Kogut, Phys.Rev.D4,3388 (1971).
- 481) J. Kuti, V.F. Weisskopf, Phys.Rev.D4,3418 (1971).
- 482) R. McElhaney, S.F. Tuan, Phys.Rev.D8,2267(1973).
- 483) A. Chodos, R.L. Jaffe, K. Johnson, C.B. Thorn, V.F. Weisskopf, Phys.Rev.D9,3471 (1973), etc, etc,.

- 484) S.L. Glashow, Scientific American, 223, (4), 38 (1975).
- 485) J. Kogut, L. Susskind, Phys.Rev.D9, 697 (1974). Ainsi que réf.480.
- 486) A. Salam, dans Elementary Particle Physics (Nobel Symposium, éd.N. Svartholm, Stockholm, 1968).
- 487) C.N. Yang, R.L. Mills, Phys.Rev.96, 191 (1954).
- 488) P.W. Higgs, Phys.Letters, 12, 172 (1964) ; Phys.Rev.Letters, 13, 508 (1964) ; Phys.Rev. 145, 1156 (1966).
T.W.B. Kibble, Phys.Rev., 155, 1554 (1967).
Pour une liste plus complète de références voir : S. Weinberg, Rev.Mod.Phys. 46, 255 (1974).
- 489) G.'t Hooft, Nucl.Phys. B33, 173 (1971) ; B35, 167 (1971).
G.'t Hooft, M. Veltman, Nucl.Phys. B44, 189 (1972); B50, 318 (1972).
- 490) Voir p.ex. I. Bars, M.B. Halpern, M. Yoshimura, Phys.Rev.D6, 676 (1973). J.C. Pati, A.Salam, Phys.Rev.D8, 1240 (1973). H.Georgi, S.L.Glashow, Phys.Rev.Letters, 32, 438 (1974). S.Weinberg, Scientific American, 231, (1), 50 (1974) , etc...
- 491) J.H. Cristenson, G.S.Hicks, L.M.Lederman, P.J.Limon, B.G.Pope, Phys.Rev.Letters, 25, 1523 (1970).
- 492) W. Braunschweig et al. Phys.Letters, 53B, 393, 491 (1974).
- 493) S.C.S. Ting, Rev.Mod.Phys. 49, 235 (1977).
- 494) G.Abrams et al. Phys.Rev.Letters, 33, 1453 (1974).
- 495) J.J. Aubert et al. Phys.Rev.Letters, 33, 1624 (1974).
- 496) J.E. Augustin et al. Phys.Rev.Letters, 34, 764 (1975).
- 497) G.S. Abrams et al. Phys.Rev.Letters, 34, 1181 (1975).
- 498) W. Braunschweig et al. Phys.Letters, 55B, 407 (1975).
- 499) G. Feldman et al. Phys.Rev.Letters, 35, 821 (1975).
- 500) H. Schopper, Courrier CERN, 15, 317 (1975) et rapports DESY 34, 37/75.
- 501) D.E. Andrews et al., Phys.Rev.Letters, 34, 231, 1134 (1975).
J.F.Martin et al. Phys.Rev.Letters, 34, 288 (1975).
B. Knapp et al. Phys. Rev.Letters, 34, 1040, 1044 (1975).
J. Dakin et al. Phys. Letters, 56B, 405 (1975).
- 502) A. De Rujula, S. Glashow, Phys.Rev.Letters, 34, 43, 46, 365 (1975).
Aussi E. Eichten et al. Phys.Rev.Letters, 34, 369 (1975).
- 503) a) W. Chinowski, Ann.Rev.Nucl.Sci. 27, 393 (1977).
b) D. Cline, W.F. Fry, ANn.Rev.Nucl.Sci. 27, 209 (1977).
c) G.H. Trilling, Phys.Rep. 75, 57 (1981).
d) E. Bloom, G. Feldman, Scient.Amer. Mai 1982.

- e) Particle Data Group : Review of Particle Properties, Phys.Lett. 111B,
Avril 1982.
- f) B. Harrington et al., Phys.Rev.Lett. 34, 706 (1975).
- 504) Voir réf. 503 c, e, et G. Godhaber et al. Phys. Rev.Lett. 37, 251
(1976); I. Petruzzi et al. Phys.Rev.Lett. 37, 569 (1976);
G.Feldman et al. Phys.Rev.Lett. 38, 1313 (1977) ; M. Piccolo et al.
Phys.Lett. 70B, 260 (1977) ; C. Baltay et al. Phys.Rev.Lett. 41, 73 (1978).
- 505) E. Cazzoli et al., Phys.Rev.Lett. 34, 1125 (1975).
B. Knapp et al., Phys.Rev.Lett. 37, 822 (1976).
H. Deden et al., Phys.Lett. 67B, 474 (1977).
- 506) C. Angélini et al. Phys.Lett. 80B, 428 (1979) ; 84B, 150 (1979).
D. Drijard et al., Phys.Lett. 85B, 452 (1979)
W. Lockman et al., Phys.Lett. 85B, 443 (1979)
K.L. Giboni et al., Phys.Lett. 85B, 437 (1979)
- 507) A. Cnops et al., Phys.Rev.Lett. 42, 197 (1979).
- 508) C. Baltay et al., Phys.Rev.Lett. 42, 1721 (1979).
- 509) Réf. 503 c.
- 510) D.B. Lichtenberg, Phys.Rev. D12, 2756 (1975).
M.K. Gaillard et al., Rev.Mod.Phys. 47, 277 (1975).
- 511) M.L. Perl, P.Rapidis, SLAC-PUB 1496 (1974) ; 2752 (1981).
- 512) M.L. Perl, W.T. Kirk, Scient.Amer. 238(3), 50 (1978).
M.L. Perl, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 30, 299, (1980).
M.L. Perl et al. Phys.Rev.Lett. 35, 1489 (1975) ; Phys.Lett. 63B,
466 (1976) ; 70B, 487 (1977); G.Feldman, Comments Nucl.Part.Phys. 9(1) 23
(1979)
- 513) R. Brandelik et al., Phys.Lett. 70B, 125 (1977).
J. Burmester et al., Phys.Lett. 68B, 297, 301 (1977).
- 514) Asao Sato, UTLICEPP 82/03 Février 1982 (Tokyo)
- 515) L.M. Lederman, Scient.Amer. 239(6), 60 (1978)
- 516) S.W. Herb et al., Phys.Rev.Lett. 39, 252 (1977)
M.R. Innes et al., Phys.Rev.Lett. 39, 1640 (1977).
K. Ueno et al., Phys.Rev.Lett. 42, 486 (1979).
- 517) H. Harari, Intern.Symp.on Lepton and Photon Inter. at High-Energy
Stanford, 22 Août 1975
- 518) D. Andrews et al., Phys.Rev.Lett. 45, 219 (1980).
G. Finocchiaro et al., Phys.Rev.Lett. 45, 222 (1980).
P. Franzini, J.Lee-Franzini, Phys.Rep. 81(3) 239 (1982).
- 519) E. Eichten, K. Gottfried, Phys.Lett. 66B, 286 (1977)
C.E. Carlson, R. Suaya, Phys.Rev.Lett. 39, 908 (1977).

- 520) BMS, Physics Today, Octobre 1980 p.19
- 521) J. Gasser, H. Leutwyler, Phys.Rep.87(3),77(1982).
H. Fritzsch, P. Minkowski, Phys.Rep.73(2), 67 (1981)
- 522) La bibliographie sur les théories unifiées est absolument énorme;
pour une première orientation on peut consulter :
 - a) S. Weinberg, Scient.Amerc.,231(1)50 (1974); Rev.Mod.Phys.46,
255(1974) ; Am.Sci65,171 (1977) ; Daedalus,106,17(1977) ;
Science,210 1212 (1980) ; Rev.Mod.Phys.52, 515 (1980) ;
Scient.Amer.244(6) 52 (1981).
 - b) J. Iliopoulos, Bull.Soc.Franç. de Physique n°33, p.13 (1979)
 - c) S. Glashow, Scient.Amer.233(4) 38 (1975) ; Rev.Mod.Phys.52,
539 (1980).
 - d) H. Georgi, Scient.Amer.244(4) 40 (1980).
 - e) H. Georgi, S. Glashow, Physics Today Sept 1980 p.30
 - f) M. Gaillard, Comments Nucl.Part.Phys.9 (2) 39 (1980).
 - g) A. Salam, Rev.Mod.Phys.52,525 (1980)
 - h) G.'t Hooft, Scient.Amer.242 (6) 90 (1980).
- 523) S. Glashow, Nucl.phys.10,107 (1959).
A.Salam, J.C. Ward, Nuovo Cimento 11,568 (1959)
S. Weinberg, Phys.Rev.Lett.27,1264 (1967).
- 524) A. Salam, J.L. Ward, Nuovo Cimento 19,165 (1961).
- 525) J.C. Pati, A. Salam, Phys.Rev.D8,1240 (1973).
- 526) J. Learned et al., Phys.Lett.43B,907 (1979).
- 527) H.R. Krishnawami et al., Phys.Lett.106B,339(1981) ; 115B,349(1982)
M.L. Cherry et al. Phys.Rev.Lett47,1507(1981).
- 528) S. Weinberg, cité par R.P. Shutt dans Elementary Particles, Science
Technology and Society (N.Y. London 1971) p.1-48 Edit.L.C.L. Yuan
- 529) V.F. Weiskopf, Comments Nucl.Part.Phys.9 (2) 49 (1980)
- 530) A. Einstein, 1933 Herbert Spencer Lecture.
- 531) Courrier CERN,22(9) 368 (1982).
- 532) H.Fritzsch,Proc.J.Hopkins Workshop of current Problems in Particle
Theory.Florence 1982,p.211.

INDEX

A

Aamodt R.L.	438	Annis M.	154
Abrams G.	450	Antipov Y.M.	444
Aepinus F.U.Th.	389	Apollinaire G.	382
Adler S.L.	340	Araki G.	436
Aggson T.L.	439	Archimède	33
Agnew L.E.	444	Aristarque de Samos	33
Aizu K.	441	Aristote	II, 3; 5, 22, 31, 32, 33, 35, 36,
Albert-le-Grand	40	37, 38, 39, 43, 52, 377, 385, 387, 431	
Alcmaion de Crotone	18	Arley N.	233, 443
Alembert d'-Jean-le Rond	44, 67, 72,	Armenteros R.	437, 439, 440, 444
Alichanian A.I.	436	Arnauld-de-Villeneuve	40
Alichanov A.I.	436	Asao Sato	451
Alei E.F.	445	Astbury J.P.	154
Alf C.	446	Aston F.W.	83, 96, 106, 433
Alford W.L.	445	Atkinson W.R.	412
Ali L.	445	Aubert J.J.	450
Allen J.S.	448	Auger P.	436
Alston M.H.	445	Augustin J.-J.	450
Alvarez L.	188, 192, 440, 441, 446	Avicenne	36, 37, 431
Alvensleben H.	327, 449	Awscholom W.	447
Amaldi E.	406, 443		
Amati D.	447		
Ambler E.	443	Bacher R.F.	122, 212, 434, 442
Ammar R.	441	Bacon F.	43
Ampère A.-M.	77, 385, 389, 390	Bacry H.	446, 447
Anand B.M.	438	Baillon P.	418
Anaxagore	12, 14, 15, 22	Bainbridge K.T.	96
Anaximène	12	Baldo-Ceolin M.	441
Anderson C.D.	109, 110, 113, 128, 129	Ballam J.	441
	154, 375, 398, 402, 403	Baltay C.	451
	404, 406, 434, 437, 440	Bander M.	410
Anderson E.C.	448	Barbour I.	437
Anderson H.L.	445	Bardon M.	443
Andrews D.E.	450, 451	Barger V.	446
Angelini C.	451	Barkas W.H.	437, 440

B

Barker K.H.	436,437,439,440,441	Bjørken J.D.	318,333,337,447,449
Barish B.C.	414	Bjorklund R.	438
Barkla C.G.	89,432	Black J.	64,65
Barnes V.E.	441	Blackett B.M.S.	104,109,154,399,406 434
Baroni G.	437	Blau M.	144,436
Barrett P.H.	440	Blewett J.P.	144,437
Bars I.	450	Block M.M.	224,225,446,448
Bartel W.	449	Blokintsev D.I.	441
Bartlett J.H.	120	Bloom E.D.	449,450
Bartlett M.S.	212	BMS	418
Bauer C.	80	Bodoszewski	396
Baumé A.	64,67	Boerhave H.	41,45,47
Bayer	389	Bohr N.	92,93,104,117,118,122,123
Becher J.J.	39,49,50,62		149,397,400,401,432,433
Becher H.	106,433	Boltzmann L.	81
Becker U.	449	Bonetti A.	440
Becquerel A.C.	389	Borel P.	45
Béguin J.	45,49	Borelli G.A.	45
Belifante F.J.	399	Borrichius O.	52
Belliboni G.	437	Boscovich R.Y.	389
Bergvist K.E.	447	Bose S.N.	101
Berley D.	446	Both E.T.	438,439
Berman S.M.	414,431	Bothe W.	106,401,433
Bernardini G.	448	Bottino A.	446
Bernouilli D.	72,81	Bouquet	65
Berthollet Cl.	65,69,70,71,73,389	Bousser Fr.	437
Bertram W.K.	449	Boyle R.	42,47,50,51,64,70,374,385
Berzelius J.	75,77,78,81,82,389	Bradner H.	440
Bethe H.A.	119,122,126,142,212	Bradt H.L.	435
	250,262,403,404,412	Bramson H.	437
	434,436,438,442,445	Brandelik R.	451
Bhabha J.H.	215,249,250,403,404	Braunschweig W.	450
	442,444,445	Breidenbach M.	449
Bienlein J.K.	448	Breit G.	349,442
Bigl H.J.	397	Bridge H.	154,439,443
Bilaniuk O.M.P.	303,447	Broadbent D.	436
Birge W.	442	Brode R.B.	129,435,436
Birnbaum W.	437	Brodsky S.	419
Biswas S.	437,440	Broebeck M.W.	191

Brogie de- L.	100,101,242,396	Chambers E.E.	444
Bromberg J.	400	Chancourtois de-,A.E.	84
Brown R.	80,396,437	Chang C.S.M.	405
Brown S.L.	447	Chanowitz S.M.	418
Brueckner K.	262,445	Charlemagne	35
Brugger H.	446	Chapman A.H.	437
Bude B.	439	Charles J.	74
Buddha	278	Châtelet Maequise de-	388
Burhop E.H.S.	436,444	Chémès (Chymès)	38
Burnet J.	431	Chen M.	449
Burmeister H.	448	Cheng H.	243,444,445
Burmester J.	451	Cherry M.L.	452
Butler C.C.	155,156,169,170,436	Chester R.	439
	437,440	Chew G.	284,287,408,446
Byfield H.	438	Child J.M.	388
		Chinofski W.	438,439,443,450
		Chodos A.	449
	<u>C</u>	Chrétien M.	439
Cabibbo N.	231,232,443,447	Christensen C.J.	108
Cachon A.	437,440	Christenson J.H.	286,443,450
Camerini U.	437	Christophilos N.	192
Cameron A.G.N.	413	Christy R.F.	436
Camp G.D.	214,442	Clairault A.	72
Cannizzaro S.	77,389,394	Clark D.	438
Carbonelle	396	Classon J.L.	433
Carelli C.M.	440,441	Claus	389
Carlisle A.	80	Clausius R.	81,390
Carlson A.G.	438	Clave E.	49
Carlson C.E.	451	Clebsch A	283
Carnot Sadi N.L.	79	Clément d'Alexandrie	35
Cartwright W.F.	438	Cline D.	412,450
Cassen B.	212,442	Cnopps A.	451
Castagnoli C.	437,443	Coates M.S.	441
Cazzoli E.	451	Cockroft J.D.	121,134,435
Cerenkov P.A.	117,234,351	Cohen K.J.	449
Cesarolli R.	446	Cohn H.O.	440
Chadwick G.B.	445	Colley M.	446
Chadwick J.	91,102,105,106,107,118	Compton A.H.	99,100,106,400,433
	375,399,432,433,434	Condillac E.de-	45
Chamberlain O.	443		

Elster J.	127,434	Fresnel Aug.	72,98
El'Yashvich M.A.	395	Fretter W.B.	142,154,406,436, 439
Empédocle	12,14,15,22,386	Friedlander M.W.	439
Engler A.	446	Friedman J.I.	441,443,449
Epicure	32,45	Friessen E.W.	439
Eratosthène	33	Fritzs H.	295,377,447,452
Erwin A.R.	445	Frölich H.	442
Euclide	33,38	Fry W.F.	412,440,441,450
Euler L.	72,384	Fulco J.R.	444
Eve A.S.	103,233,433,443	Furry W.H.	305,447

F

G

Faissner H.	448	Gaillard J.M.	417,448,451,452
Fajans K.	83,93	Galilei Galileo	43
Falk-Vairant P.	440	Gamov G.	213,412,442
Faraday M.	80,345,392,395	Gardner E.	405
Farlington B.	431	Gardner M.	442
Fazzini T.	443	Gardner W.L.	405,437
Feenberg E.	212,442	Garwin R.L.	443
Feinberg G.	300,437,438,447,448	Gassendi P.	43,45
Feldman G.	450,451	Gassiot J.P.	81
Fermi E.	101,108,117,119,120,123 124,125,126,134,135,167 201,204,214,222,225,228 230,233,234,261,262,287 303,312,345,403,434,443 444,445,446	Gaudin M.A.	385,389
Ferrari E.	435	Gay-Lussac J.	75
Ferrero F.	448	Gayther D.B.	439
Feshbach H.	447	Géber (Jabir ibn Hayyan)	38,40
Feynman R.	116,167,224,225,230,346 263,321,322,338,339,346 414,434,438,443,448,449	Geiger H.	90,102,134,196,402,432
Fidecaro G.	443	Geissler H.	81
Finocchiaro G.	451	Geitel H.	127,434
Fiorini E.	437	Gelfang U.	446
Fitch V.L.	443	Gell-Mann M.	172,176,187,202,203,204 206,208,215,216,218,219 221,222,228,229,230,266 277,280,287,294,295,321 346,373,376,409,414,440 438,439,440,441,442,443 445,446,447,448
Fleury N.	447	Geoffroy l'Ainé E.	65
Flum R.S.	440	George E.P.	439
Fontainelle E.de-	42,61,432	Georgi H.	414,416,450,452
Fourcroy A.F.	71	Gerber H.J.	448
Fournier	105	Gerhard Ch.	77
Fowler P.H.	437	Germer L.H.	100,433
Fowler W.B.	413,440,441,442,444	Giacomelli G.	437
Frampton P.H.	412	Giboni K.L.	451
Franck C.H.	147	Gilbert W.	391
Franck J.	397	Gilly L.	444
Franck S.G.F.	448	Glaser D.A.	196
Frankland	388	Glashow S.L.	295,297,341,348,359,414 416,447,450,452
Franklin B.	391,392	Glicksman M.	445
Franzinetti C.	437,438	Gmelin L.	77
Franzini P.	451	Gockel A.	127,434
Fraser W.R.	444	Goldhaber A.S.	398
Frautschi S.C.	284,446	Goldhaber G. *	354,439,451
Freier P.	435	Goldstein E.	82,96,392,433
French B.R.	441,444	Goldstone J.	347
Fréon A.	436	Goldwasser E.L.	436
		* Goldhaber M.	419

<u>J</u>			
Jaffe R.L.	449	Kurie F.N.D.	304,401
James G.D.	441	Kurrelmeyer B.	409
Janossi L.	436	Kusaka S.	436
Jauneau Louis	184,440	Kuti J.	341,414,449
Jesse W.P.	435		
Johnson K.	449	<u>L</u>	
Joliot-Curie Irène voir Curie I.		Lagarrigue A.	437,439,440
Joliot Frédéric	105,106,107, 134 433,434	Lagrange L.de-	72
Joseph d'Alexandrie	35	Lal D.	441
Joule J.P.	80,390	Lambertson C.R.	444
Joyce J.	378	Landau L.D.	228,443
Justinien(Empereur)	34	Lande K.	439,443
		Lander R.	444
<u>K</u>		Landsberg R.G.	446
Kabir P.R.	442	Langer L.M.	447
Kaftanor V.	448	Laplace P.-S.	71,72
Kalbfleisch G.R.	411	Lapp R.E.	436
Kaplon M.F.	439	Lapshin V.A.	444
Keefe D.	439	Larmor J	389
Kekulé A.	83,389	Lattes C.M.G.	436
Kelvin Lord-(Thomson)W.	80,83,89 392,393	Laue M.von-	93
Kemmer N.	213,402,404,442	Laurent A	77
Kepler R.J.	43	Lavoisier A.L.	41,42,65,66,67,68,69,70 71,77,385,432
Kepler R.J.	386,439	Lawrence E.O.	134,167,192,234,435
Keren I.	448	Lazarus A.J.	438
Kessler J.	438	Lebedev A.A.	444
Khrimjan A.V.	436	Lecoq de Boisbaudran	394
Kibble T.W.B.	347,450	Learned J.	452
King D.T.	438	Lecourtois A.	448
Kinoshita S.	436,441	Lederman L.	351,365,366,437,438,439 443,444,448,451
Kirk W.T.	451	Lee B.W.	444
Klarman J.	439	Lee T.D.	225,226,228,308,310,321,402 442,443,448,450
Klein M.J.	400	Lee W.	444
Klein O.	443	Lee-Franzini J.	451
Kluyver J.C.	448	Lefèvre N.	49
Knapp B.	450,451	Leibnitz G.W.	42,60,431
Knasel T.M.	449	Leighton R.B.	154,437,440,441,445
Kofoed-Hansen O.	405	Leipuner A.J.	303,447
Kogut J.	342,449,450	Leite-Lopes J.	447
Kokkedee J.	446	Leitner J.	439
Kolbe H.	388	Lemerle P.	431
KolhÖster W.	127	Lémery N.	46
Konopinski E.J.	212,309,310,442,448	Lenard P.E.A.	392,393
Kraemer R.	446	Lendel A.I.	445
Kramer P.	446	Leprince-Ringuet L.	129,130,153,160 181,406,435,436,438,439,440
Kramers H.A.	400	Leucippe	15,16,32
Kranz W.	433	Leutwyller H.	452
Krehbiel H.	449	Levy M.M.	444
Krienen F.	448	Levi-Setti R.	437,440,441
Krishnawami M.R.	452	Lewis G.N.	100,433
Krönig A.	81	Lichtenberg D.B.	446,451
Kruse H.W.	448	Limentani S.	441,445
Kruse U.	445		
Kunsmann C.H.	433		

Limon P.J.	450	McCusker G.	441
Lindenbaum S.J.	438,445	McElhaney R.	449
Lindhard	405	McElroy J.	449
Lipkin H.	442	McGuire A.D.	448
Littauer R.M.	444	McIlwraith C.G.	409
Livingston M.S.	134,435,441	McMillan E.B.	168,191,234,438,441
Llewellyn-Smith C.H.	340	Mehra J.	434
Loar H.	438	Meitner Lise	399,434
Lock W.O.	436,437	Melissos de Samos	18,19
Locke J.	45,387	Mendéléév D.	I,77,82,84,85,96,272, 376,390,394,393,432
Lockman W.	451	Menon M.G.K.	159,199,436,437,439
Lofgren E.J.	435	Menshutkin B.N.	395
Lomonosov M.V.	388	Merkle T.C.	436
Long E.	445	Merrison A.V.	443
Longoni A.M.	446	Mersenne M.	45
Lorentz H.A.	345,387,393	Metropolis N.	445
Loschmidt J.	81,388,392	Metzger C.	446
Lucrèce	32	Meyer L.	84
Luers D.	443	Meyer O.E.	81,432
Lulle Ramon	40,41	Meyer St.	105
		Michel L.	406
<u>M</u>		Miller D,	441
Mach E.	83	Millikan R.A.	80,88,396,398,432
Macquer P.J.	64	Mills R.L.	347,450
Maglic B.C.	446	Minkowski P.	452
Mahmoud H.M.	309,310,448	Misty N.	448
Maiani L.	295,348,447	Mitscherlich E.	77
Majorana E.	119,212,303,305,434	Mittra J.S.	443
Mandelstam S.	286,409	Miyazawa H.	441
Manfredini A.	443	Mo L.W.	449
March R.	445	Moffat R.J.D.	447
Mariotte Edme	64,387	Moïse	38
Markwald W.	83	Møller C.	409
Marsden E.	90,432	Mollerud R.	448
Marshak R.E.	149,250,404,405,438,443	More L.T.	431
Marshall L.	444	Morosov A.G.	444
Marshall R.	449	Morosov V.M.	436
Martin J.P.	450	Morpurgo G.	438
Martin R.	445	Morrison D.	445
Martin W.	441	Moseley H.G.	85,92,93,94,96,102,432,433
Martinelli E.A.	438	Mott N.E.	237,238,329,332,444
Marx G.	412	Moyer B.J.	438
Massey H.	449	Muchin A.	445
Masson A.	81	Mueller W.	134,196
Matsen R.P.	442	Muirhead H.	437
Mattauch J.	96	Mukherji V.	435
Maxwell J.C.	81,160,345,391	Muller F.	439,440,442
May M.M.	439	Muller J.	446
Mayer J.R.	78,88,89,390	Mulvey J.H.	445
Maze R.	436	Myatt G.	448
Mazek G.E.	438		
Mazurs E.G.	395	<u>N</u>	
McAllister R.W.	444	Nagaoka H.	89,432
McCarthy J.A.	447	Nagle D.E.	445
McColm D.W.	438	Nakada M.P.	439
McCord R.V.	108	Nambu Y.	441,444,447
McCormach R.	395		

Nash J.	446	Parménide	13,14,18,19,38
Nauenberg D.	446	Pascal Bl.	51
Neagu D.	443	Paty J.C.	379,416,448,450,452
Neddermeyer S.	129,403,434	Pati M.	310,448
Ne'eman Y.	277,446	Paul M.	443
Nernst W.	105,433	Pauli W.	101,112,120,122,123,215,238
Ney E.P.	435		262,375,376,399,400,403,407
Newland J.A.	84,92		411,433,434,442,445
Newth J.A.	154	Paschos E.A.	449
Newton I.	42,45,52,55,59,60, 72,203	Paxton H.C.	401
	345,431	Peaslee D.C.	442
Nicholson W.	80,93,433	Perkins D.	144,150,448
Nicolic M.	448	Perl M.	451
Nicolo M.	451	Perrin Fr.	123,124,233,434
Nier A.O.	96	Perrin J.	80,81,85,87,89, 432
Nieto M.M.	398	Persico E.	435
Nilson	394	Peters B.	406,435,441
Nishijima K.	176,216,310,440,448	Peterson J.	438
Nishina Y.N.	435	Petit A.T.	99
Noma M.	404	Petrov N.I.	443
Noon J.H.	439	Petrushkin A.I.	444
Nussbaum M.	446	Petruzzi I.	451
Nuyts J.	446,447	Pettenkofer	84
		Pevsner A.	446
<u>O</u>		Peyrou Ch.	437,439,440
Occhialini G.P.S.	109,143,399,434	Phillip K.	399
	436,438	Philopon	35
O'Ceallaigh C.	159,164,437,438	Piccolo M.	451
Odling	84	Picioni O.	206,207,208,436,441,442,444
Okonov E.	443	Planck M.	81,86,98,99,391,417,432,433
Okubo S.	215,417	Plano R.	439,440,443,446
Okun L.	200	Platon	1,1,12,20,21,22,31,35,36,39
Oliphant M.L.	191		50,55, 296,373,383,384, 385
Olson D.	444		386,431
Olympiodore	38	Pleasanton F.	108
Omnès R.	446	Plücker J.	81,87
Oneda S.	310,441,448	Pniewski J.	441
Ono	105	Podolski B.	210
Oppenheimer J.R.	117,181,199,202	Poincaré H.	388
	213,402,435,441,442	Polos	6
Orthman W.	434	Pomeranchuk I.Ya	256,277, 445
Osborn H.	402	Ponte M.	100,433
Oserov E.	445	Pontecorvo B.	162,163,305,310,312,403
Ostwald W.	83,85		413,437,445,448
Øswald L.	442,444	Pope B.G.	450
Ovide	38	Powell C.F.	141,144,159,160 401,406
			413,437,445,448
<u>P</u>		Powell W.	442,444
Pais A.	172,199,200,202,204,206	Prentki J.	447
	208,218,439,441,442	Preparata G.	447
Pal Y.	441	Prepost R.	438
Pancini E.	436	Present R.D.	212
Pandore	376	Price J.	42
Panetti M.	440	Primakoff H.	447
Panofsky W.K.H.	193,354,405,438,449	Pristley J.	64,65,66
Parcelce Voir Hohenstein		Prodell A.	443
		Prokoshkin Y.D.	444
		Prométhée	376

Proust J.L.	73	Ruhmkorff H.D.	81
Prout W.	77	Rújula A. Voir De Rújula	
Ptolémée Soter	33	Rumford Comte de-, B. (Thompson)	78
Ptolémée Cl.	33	Rupp E.	433
Puppi G.	228, 229, 443	Rusakon B.A.	443
Pythagore	18	Russel A.S.	83, 93
Pythagoriciens	16, 383	Rutherford of Nelson, Lord E.	84, 89, 90

Q

Quigg C.	402	Rydberg J.R.	298, 398
Quinn D.J.	416, 449	Rykalin V.I.	444

R

S

Rabbi I.I.	444		
Radeha V.	449	Sachs R.G.	212, 442
Radojicic R.	445	Safford R.	439
Rainwater L.J.	438, 444	Sagane R.	405, 437
Ramm C.A.	448	Sakata S.	143, 149, 214, 287, 310, 402
Ramsey N.	225		404, 436, 438, 442, 446
Ramsey W.	80	Sakharov A.	419
Ranft J.	446	Sakurai J.J.	263, 444, 445
Rankine W.J.M.	80	Salam Ab.	325, 347, 381, 415, 416, 443
Rapidis P.	451		449, 450, 452
Rau R.R.	441	Salit A.	447
Ravenhall D.G.	444	Salmeron R.	441, 448
Raza Rahman	402	Sambursky S.	398
Razuraev E.A.	444	Samios M.	439, 440, 443
Regge T.	274, 275, 276, 277, 446	Sanders G.	449
Régis S.	61	Santangelo R.	445
Reid A.	100, 433	Scarsi L.	438
Reines F.	108, 311, 411, 413, 447, 448	Scharre D.	418
Reinharz M.	448	Scheele C.W.	65, 66
Reynolds G.T.	441, 442	Schein M.	141, 160, 435
Rhazès	38	Schläfli L.	385
Richard-Foy R.	436	Schlein P.	446
Richardson C.	446	Schmidt W.	449
Richardson J.R.	401, 438	Schneps J.	440, 441
Richman C.	438	Schopper H.F.	444, 450
Ritson D.M.	437	Schrödinger E.	100
Roberts A.	438	Schubel H.	449
Roberts G.E.	129, 131, 435	Schultz E.K.	446, 448
Robson J.M.	108	Schultz J.	446
Rochat O.	437	Schuster A.	393
Rochester G.D.	155, 169, 170, 406, 436	Schwartz M.	310, 439, 440, 443, 448
Rogers L.C.	449	Schwinger J.	310, 346, 448
Rohde M.	449	Sechi B.	437
Rosanova A.M.	443	Segrè E.	435, 444
Rose B.	365	Seiler P.G.	448
Rose M.E.	444	Séleucos	33
Rosen N.	210	Serber R.	213, 214, 442
Rosenbluth M.N.	238, 243, 246, 332, 443	Serrif A.J.S.	437
	444	Seubers O.	393
Rosenfeld A.H.	438, 440, 442, 446	Shapiro M.M.	435, 436
Rosenfeld L.	92, 409, 432	Shepard W.	440
Rosser W.G.V.	436	Shovalov R.S.	444
Rossi B.	406, 439, 441, 443	Shutt R.P.	440
Ruderman M.A.	413, 438	Sichirolo A.	441

Silberberg R.	435	Taylor R.E.	449
Simonide	9	Teller E.	213,442
Skobelzyn D.	398	Telegdi V.I.	441,443
Slater J.C.	400	Teng L.C.	403
Smolukowski	396	Teplitz V.L.	447
Smith F.M.	437,440	Terazawa H.	417
Snell A.H.	108	Ter Martyrosian K.A.	445
Snow G.A.	440	Thalès	42,373,391
Snyde- H.	441	Théophraste	32
Socrate	11	Thomas L.	191,441
Soddy F.	83,93	Thompson B.	Voir Rumford
Soljanick V.I.	444	Thompson R.V.	154,161,175,437,439,440
Solmitz F.T.	440		444
Solomon J.	434	Thomson G.P.	100,400,406,433
Solutsev N.	439	Thomson J.J.	83,87,88,89,90,92,93,96
Sommerfeld A.	301,447		103,387,393,395,432,433
Soop K.	448	Thomson W.	80,83;89;392,393
Sosistrate	33	't Hooft G.	347,450,452
Sreekantan B.V.	439	Toohig T.	446
Stahl G.E.	62,63,64,70,432	Thorn C.B.	449
Starr B.	435	Thorndike A.M.	438,440
Stass J.S.	78	Ticho H.K.	440,444
Staude A.	448	Ting S.C.C.	354,366,444,449,450
Stein J.	448	Tiomno J.	405,443
Steinberg R.	397	Tollestrup A.V.	443
Steinberger J.	171,405,437,438,439	Tomasini G.	437,440
	440,443,446,448	Tomonaga S.I.	346,436
Steiner H.	444,448	Torricelli E.	51,81
Steller J.	405,438	Townley R.	388
Stevenson M.L.	129,435,446	Townsend J.S.	396
Stoney J.	88,395	Treiman S.B.	441,442
Stoyanova D.A.	444	Trilling G.	439,450
Strand R.	446	Trimble V.	413
Strassmann F.	108,134,434	Tripp R.D.	440
Straton de Lampsaque	32,33	Trismosin S.	40
Stückelberg E.C.G.	441	Tuan S.F.	447,449
Stump R.	448	Turlay R.	443
Suaya R.	451	Tycho Brahé	43
Sudarshan E.C.G.	301,405,443,447		
Susskind C.	342,450		<u>U</u>
Svatholm N.	450		
Swami M.S.	440,441	Ueno K.	451
Sylvester J.J.	387	Uhlenbeck G.E.	101,212,405,433,442
Symmer	391	Urbain G.	432
Szalay A.	307,412		
			<u>V</u>
		Van de Graaff R.J.	121,134,435
		Van den Broek A.	92,93,432
		Van der Waals J.D.	81
		Van Helmont J.-B.	41,42,50,70
		Van Hove L.	446,447
		Van Lint V.A.J.	439,440
		Van Rossum L.	439
		Van Spronsen J.W.	395
		Van Vleck J.H.	93
		Varlay C.F.	81
		Veksler V.	191,441
		Veltman M.	450
	<u>T</u>		
Tachenius O.	45		
Takeda G.	445		
Takeuti M.	434		
Tallone L.	440,441		
Tamm I.	434		
Tan T.H.	446		
Tanka S.	447		
Tanikawa Y.	214,404		
Tarjane P.	447		
Tavkhelidge A	445		

Venus W.	448	Wilson H.A.	98,396
Vichnewski N.K.	444	Wilson W.	89,432
Vignone M.	440,441	Winkler C.	84
Villard M.	397	Wöhler F.	78
Virgo S.E.	396	Wojciki S.G.	440,445
Vitale B.	437	Wold D.C.	440
Vogel P.	412	Wollaston W.	75,389
Volta A.	77,390	Wooster W.A.	434
Voltaire Fr.M.	72	Wu C.S.	226,228,241,443
Von Dardel G.	448	Wu T.T.	444,445
Von Guericke O.	51		
Von Weiszäker C.F.	412		

X

W

Xénophane 18,19

Walker W.D.	440,441,445		<u>Y</u>
Walter V.	449		
Walter ?	121	Yamamoto S.S.	443
Walton E.T.S.	134,435	Yamawaki K.	419
Wambacher H.	144,436	Yang C.N.	225,226,228,233,287,308,310
Wanless S.D.	445		321,347,438,442,443,448,450
Ward J.C.	325,415,449,452	Yekutieli G.	439
Waterson I.I.	81	Yennie D.R.	444
Watson M.K.	438	Yetch F.A.	444
Weber G.	449	Yodh G.	445
Weinberg S.	325,347,376,377,413,415	Yoh J.	366
	416,449,450,452	Yokota T.	419
Weinrich M.	443	York C.M.	440
Weisskopf V.F.	215,250,272,298,341	York H.F.	438,440
	378,379,414,442,447	Yoshiki Y.	448
	449,452	Yoshimura M.	450
Wenzel G.	136,215,249,435,442,445	Young L.A.	212,442
Wenzel K.F.	77	Young T.	72,80,98
Wenzel W.A.	444	Ypsilantis T.	444
West E.	445	Yuan L.C.L.	445,452
Weyl H.	113,228,434,443	Yukawa H.	I,120,128,135,142,143,212
Wheeler J.A.	405,443		215,249,285,345,375,402,403
White H.S.	442,444		404,434,438,442
Whitehead M.N.	438		
Whitemore W.L.	440		
Wick G.C.	409		<u>Z</u>
Wicks M.E.	395	Zagtsev A.M.	444
Wiechert E.	393	Zapfe C.A.	394
Wiedeman E.	392	Zeeman P.	393
Wiegand C.	444	Zhinkeltoya G.D.	444
Wien W.	99	Ziock K.	438
Wiessenberg A.	436	Zweig G.	288,417,418,446
Wightman A.S.	409		
Wigner P.	120,211,409,441		
Wilcox H.A.	438		
Wilczek T.	413		
Wilkinson C.A.	445		
Willan E.O.	435		
Williams W.	129,171		
Williams E.	435		
Willis W.J.	443		
Wilson C.T.R.	88,97,104,109,127,128		
	129,133,154,164,170,173		
	175,195,196,303,396,398,433,434		